



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift  
⑩ DE 44 11 726 A 1

⑤1 Int. Cl. 5:  
G 01 S 5/12  
G 01 C 21/02

(5)  
DE 44 11 726 A 1

②1 Aktenzeichen: P 44 11 726.4  
②2 Anmeldetag: 5. 4. 94  
④3 Offenlegungstag: 6. 10. 94

③0 Unionspriorität: ③2 ③3 ③1  
05.04.93 US 042627

⑦1 Anmelder:  
Caterpillar Inc., Peoria, Ill., US

⑦4 Vertreter:  
Wagner, K., Dipl.-Ing.; Geyer, U., Dipl.-Phys.  
Dr.rer.nat., Pat.-Anwälte, 80538 München

⑦2 Erfinder:  
Kyrtos, Christos T., Southfield, Mich., US

⑤4 Verbessertes differentielles System und Verfahren für ein satelliten-gestütztes Navigationssystem

⑤7 Ein differentielles System und ein Verfahren, um die Position eines mobilen Empfängers auf oder in der Nähe der Erdoberfläche zu berechnen unter Verwendung eines Basisempfängers, der eine bekannte Position besitzt und unter Verwendung eines Satelliten-gestützten Navigationssystems, das eine Konstellation von Navigationssatelliten aufweist, ist offenbart. Das Verfahren weist die folgenden Schritte auf. Eine Basispositionsabschätzung wird für den Basisempfänger berechnet unter Verwendung eines Pseudoabstands von einem ersten Satelliten und Reichweiten von zwei anderen Satelliten. Eine erste Vektordifferenz zwischen der Basispositionsabschätzung und der bekannten Position des Basisempfängers wird berechnet. Eine anfängliche Positionsabschätzung wird für den mobilen Empfänger berechnet. Eine verfeinerte Positionsabschätzung wird berechnet für den mobilen Empfänger unter Verwendung eines Pseudoabstands von dem ersten Satelliten und Reichweiten von zwei anderen Satelliten. Eine zweite Vektordifferenz zwischen der anfänglichen Positionsabschätzung und der verfeinerten Positionsabschätzung des mobilen Empfängers wird berechnet. Schließlich wird eine dritte Vektordifferenz zwischen der ersten Vektordifferenz und der zweiten Vektordifferenz berechnet. Die Position des ersten Empfängers wird präzise berechnet, indem man die dritte Vektordifferenz zu der anfänglichen Positionsabschätzung für den mobilen Empfänger addiert.

DE 44 11 726 A 1

## Technisches Gebiet

5 Diese Erfindung bezieht sich allgemein auf das Gebiet von Navigationssystemen, die eine Konstellation von erdmkreisenden Satelliten verwenden, um die Position eines Empfängers auf oder in der Nähe der Erdoberfläche zu bestimmen. Genauer bezieht sich die Erfindung auf ein Verfahren und eine Vorrichtung, um die Genauigkeit von Positionsabschätzungen in solch einem satellitengestützten Navigationssystem zu verbessern.

## Ausgangspunkt der Technik

10 Einige nationale Regierungen, einschließlich der Vereinigten Staaten (U.S.) von Amerika, entwickeln gegenwärtig ein irdisches Positionsbestimmungssystem, auf das generisch als globales Positionierungssystem (GPS) Bezug genommen wird. Ein GPS ist ein satelliten-gestütztes Radionavigationssystem, mit dem man beabsichtigt, eine hochgenaue dreidimensionale Positionsinformation am Empfänger auf oder in der Nähe der Erdoberfläche zu liefern.

15 Die US-Regierung hat ihre GPS mit "NAVSTAR" bezeichnet. Man erwartet, daß das NAVSTAR GPS von der US-Regierung im Jahre 1993 für vollständig im Betrieb erklärt wird. Die Regierung der ehemaligen Union der Sowjetischen Sozialistischen Republiken (U.S.S.R.) ist mit der Entwicklung einem GPS, das als "GLONASS" bekannt ist, beschäftigt. Ferner sind zwei europäische Systeme, die als NAVSAT und GRANAS bekannt sind, ebenfalls in der Entwicklung. Um die Diskussion zu vereinfachen, konzentriert sich die folgende Offenbarung speziell auf das NAVSTAR GPS. Jedoch hat die Erfindung gleiche Anwendbarkeit für andere globale Positionierungssysteme. In dem NAVSTAR GPS ist beabsichtigt, daß vier umkreisende GPS-Satelliten in je einem von 20 sechs getrennten kreisförmigen Orbits existieren, um eine Gesamtzahl von vierundzwanzig GPS-Satelliten zu ergeben. Von diesen werden einundzwanzig im Betrieb sein und drei werden als Reserve dienen. Die Satellitenorbits werden weder polar noch äquatorial sein, sondern werden in gegenseitig orthogonal geneigten Ebenen liegen.

25 Jeder GPS-Satellit wird die Erde ungefähr einmal alle zwölf Stunden umkreisen. Dies zusammen mit der Tatsache, daß die Erde alle vierundzwanzig Stunden um ihre Achse rotiert, veranlaßt jeden Satelliten genau zwei Orbits zu vollenden, während die Erde eine Revolution bzw. Drehung macht.

Die Position jedes Satelliten zu jeder gegebenen Zeit wird präzise bekannt sein und kontinuierlich an die Erde übertragen. Diese Positionsinformation, die die Position von dem Satelliten im Raum bezüglich der Zeit (GPS-Zeit) anzeigt, ist als ephemerische Daten bzw. Information bekannt.

30 Zusätzlich zu den ephemerischen Daten, weist das Navigationssignal, das von jedem Satelliten übertragen wurde, eine präzise Zeit auf, zu der das Signal übertragen wurde. Der Abstand oder die Reichweite von einem Empfänger zu jedem Satelliten kann bestimmt werden unter Verwendung dieser Übertragungszeit, die in jedem Navigationssignal eingeschlossen ist. Indem man den Zeitpunkt notiert, an dem das Signal an dem Empfänger empfangen wurde, kann eine Ausbreitungszeitverzögerung berechnet werden. Diese Zeitverzögerung, wenn sie mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals multipliziert wird, wird einen "Pseudoabstand" von dem 40 übertragenden bzw. sendenden Satelliten zu dem Empfänger ergeben.

Diese Reichweite oder Abstand wird ein "PSEUDOabstand" oder "PSEUDObereich" genannt, weil die Empfängeruhr nicht präzise synchronisiert sein muß mit der GPS-Zeit und weil die Ausbreitung durch die Atmosphäre Verzögerungen in die Navigationssignalausbreitungszeiten einführt. Diese haben jeweils eine Uhrenabweichung (Fehler) und eine atmosphärische Abweichung (Fehler) zur Folge. Uhrenfehler können bis zu einigen 45 Millisekunden betragen.

Unter Verwendung dieser zwei Informationen (der ephemerischen Daten und des Pseudoabstands) von mindestens drei Satelliten, kann die Position eines Empfängers bezüglich des Erdmittelpunkts bestimmt werden unter Verwendung von passiver Triangulierungstechniken.

50 Die Triangulierung schließt drei Schritte ein. Zuerst muß die Position von mindestens drei Satelliten im "Blickfeld" des Empfängers bestimmt werden. Zweitens muß der Abstand zwischen dem Empfänger zu jedem Satelliten bestimmt werden. Schließlich wird die Information der ersten beiden Schritte dazu benutzt, geometrisch die Position des Empfängers bezüglich des Erdmittelpunkts zu bestimmen.

Die Triangulierung unter Verwendung von mindestens drei der umkreisenden GPS-Satelliten, erlaubt die absolute irdische Position (Längengrad, Breitengrad und Höhe mit Bezug auf den Erdmittelpunkt) von jedem 55 Erdempfänger zu berechnen über eine einfache geometrische Theorie. Die Genauigkeit dieser Positionsabschätzung hängt teilweise von der Anzahl der umkreisenden GPS-Satelliten ab, die abgetastet bzw. verwendet werden. Unter Verwendung von mehr GPS-Satelliten bei der Berechnung kann man die Genauigkeit der irdischen Positionsabschätzung erhöhen.

60 Gewöhnlich werden vier GPS-Satelliten aufgenommen bzw. abgetastet, um jede irdische Positionsabschätzung zu bestimmen. Drei der Satelliten werden für die Triangulierung verwendet und ein vierter wird hinzugefügt, um für den oben beschriebenen Uhrenfehler zu korrigieren. Falls die Empfängeruhr präzise mit den GPS-Satelliten synchronisiert wäre, dann wäre dieser vierte Satellit nicht notwendig. Jedoch sind präzise (zum Beispiel Atom-)Uhren teuer und sind deshalb nicht für alle Anwendungen geeignet.

65 Für eine detailliertere und genaue Diskussion über das NAVSTAR GPS, siehe Parkinson, Bradford W. und Gilbert, Stephen W., "NAVSTAR": Global Positioning System — Ten Years Later", Proceedings of the IEEE, Band 71, Nr. 10, Oktober 1983; und GPS: A Guide to the Next Utility, veröffentlicht von Trimble Navigation Ltd., Sunnyvale, Kalifornien, 1989, Seiten 1—47, von denen beide hier durch die Bezugnahme aufgenommen wurden.

Für eine detaillierte Diskussion eines Fahrzeugpositionierungs-/Navigationssystems, das das NAVSTAR GPS verwendet, siehe die im gemeinsamen Besitz befindende US-Patentanmeldung Ser. Nummer 07/628,560, mit dem Titel "Vehicle Position Determination System and Method", vom 3. Dezember 1990, die hier durch die Bezugnahme aufgenommen wurde.

Das NAVSTAR GPS sieht zwei Modulationsmoden oder Betriebsarten für die Trägerwelle vor unter Verwendung von pseudozufälligen Signalen. In dem ersten Mode wird der Träger durch ein "C/A-Signal" moduliert und auf ihn wird als der "Grob/Akquirierungsmode" (coarse/acquisition mode) Bezug genommen. Der Grob/Akquirierungs- oder C/A-Mode ist ebenfalls als der "Standard Positionierungsdienst" (standard positioning service) bekannt. Auf den zweiten Modulationsmode in dem NAVSTAR GPS wird allgemein als der "präzise" oder "geschützte" (P) Mode Bezug genommen. Der P-Mode ist ebenfalls als der "Präzise Positionierungsdienst" ("precise positioning service") bekannt.

Der P-Mode ist nur für eine Verwendung von Erdempfängern vorgesehen, die speziell von der Regierung der Vereinigten Staaten autorisiert wurden. Deshalb werden die P-Modesequenzen geheimgehalten und nicht öffentlich zugänglich gemacht. Dieses zwingt die meisten GPS Anwender dazu, sich allein auf die Daten zu verlassen, die von dem C/A-Modulationsmode zur Verfügung gestellt werden (was ein weniger genaues Positionierungssystem zur Folge hat).

Außerdem kann die US-Regierung (der Betreiber bzw. Operator des NAVSTAR GPS) zu gewissen Zeiten bzw. Zeitpunkten Fehler in die GPS-Daten des C/A-Modes, die von den GPS-Satelliten übertragen werden, einführen, indem die Uhren und/oder die ephemerischen Parameter verändert werden. Das heißt, die US-Regierung kann selektiv die GPS-Daten verfälschen. Die ephemerischen und/oder Uhrenparameter für ein oder mehrere Satelliten können leicht oder substantiell modifiziert werden. Dies ist als "selektive Verfügbarkeit" oder einfach SA bekannt. SA kann aus einer Vielzahl von Gründen aktiviert werden, wie zum Beispiel nationale Sicherheit.

Wenn die SA aktiviert wurde, kann die US-Regierung immer noch das NAVSTAR GPS benutzen, weil die US-Regierung Zugang zu den im P-Mode modulierten Codes besitzt. Jedoch können die C/A-Mode-Daten wesentlich weniger genau gemacht werden.

Zusätzlich zu dem Uhrenfehler, dem atmosphärischen Fehler und Fehlern auf Grund der selektiven Verfügbarkeit, schließen andere Fehler bzw. Fehlerquellen, die die GPS-Positionsrechnungen betreffen Empfänger-rauschen, Signalreflektion, Abschattungseffekte und Satellitenpfadverschiebungen (zum Beispiel Satellitenwakeln) ein.

Diese Fehler haben eine Berechnung von fehlerhaften Pseudoabständen und fehlerhaften bzw. falschen Satellitenpositionen zur Folge. Fehlerhafte Pseudoabstände und fehlerhafte Satellitenpositionen führen ihrerseits zu einer Verringerung in der Präzision von Positionsabschätzungen, die für ein Fahrzeugpositioniersystem berechnet werden.

Ein differentielles GPS-System (das hier weiter unten diskutiert wird), wird viele dieser Fehler kompensieren oder korrigieren. In einem differentiellen System werden GPS-Navigationssignale, die an einer Basisstation empfangen werden, verwendet in Verbindung mit der bekannten Position der Basisstation, um eine oder mehrere (gerichtete) Fehler oder Abweichungen zu berechnen. Diese Fehler, wenn sie dem Fahrzeug mitgeteilt werden, können verwendet werden, um die Genauigkeit von GPS-Positionsabschätzungen zu verbessern.

Bekannte differentielle bzw. Differential-GPS-Systeme werden viele dieser Fehler, die die GPS-Positionierungsgenauigkeit vermindern, kompensieren oder korrigieren. Jedoch sind der Uhrenfehler und die Fehler, die von der SA herrühren nicht linear. Bekannte differentielle Techniken versuchen diese nichtlinearen Fehler zu korrigieren unter Verwendung einer Approximation nullter Ordnung. Das führt zu einer weniger als idealen Fehlerkorrektur bzw. Verbesserung.

Ein anderes Problem mit den konventionellen differentiellen GPS-Techniken liegt darin, daß dieselben vier Satelliten sowohl an der Basisstation als auch dem Fahrzeug zugänglich bzw. verfügbar sein müssen. Jedoch ist dies nicht immer möglich. Abschattungen (d. h. durch Berge, Wände einer offenen Grube oder Mine, Bäume, Gebäude, etc.) können eine Basisstation und ein Fahrzeug daran hindern, direkte Sichtlinienkommunikationen mit denselben vier Satelliten zu errichten.

Noch ein weiteres Problem mit den konventionellen differentiellen GPS-Techniken liegt darin, daß die Verzögerungszeit zwischen der Berechnung von Fehlern an einer Basisstation und die Verwendung der Fehler an einem Fahrzeug Fehler in die Positionsrechnungen einführen kann. Die Verzögerungszeiten können von der Größenordnung von einigen Sekunden sein.

Was benötigt wird, ist ein differentielles GPS-System/Verfahren, das genauer Fehler von den GPS-Positionsrechnungen eliminiert, und das nicht erforderlich macht, daß dieselben Satelliten sowohl an der Basisstation und dem Fahrzeug verfügbar sind.

### Die Erfindung

Die Erfindung ist ein differentielles System und ein Verfahren, um die Genauigkeit von Fahrzeugpositionsabschätzungen zu verbessern. Die Erfindung berechnet einen Positionsoffset an einer Basisstation (die einen Basisempfänger besitzt), der von dem Pseudoabstand und den ephemerischen Fehlern für einen einzelnen Satelliten herrührt. Dann wird ein Positionsoffset bzw. eine -verschiebung an dem Fahrzeug (das einen mobilen Empfänger besitzt), der von Pseudoabstands- und ephemerischen Fehlern für denselben Satelliten herrührt, berechnet. Indem man den Offset, der an der Basisstation auftritt, von dem Offset, der an dem Fahrzeug auftritt, abzieht, kann ein präziser Positionsoffset des Fahrzeugs berechnet werden. Die präzise Position des Fahrzeugs wird berechnet, indem man diesen Offset zu einer anfänglichen Fahrzeugpositionsabschätzung addiert.

Das Verfahren weist die folgenden Schritte auf. Eine Basispositionsabschätzung wird berechnet für den

Basisempfänger unter Verwendung eines Pseudoabstands von einem ersten Satelliten und Reichweiten bzw. Abstände von zwei anderen Satelliten. Hinsichtlich des Gebrauchs bezeichnet hier eine "Reichweite" oder "Entfernung" einen berechneten Abstand zwischen zwei gegebenen Endpunkten (zum Beispiel zwischen einem Satelliten an der Stelle  $x, y, z$  und einer Basisstation an der Stelle  $x_B, y_B, z_B$ ). Eine erste vektorielle Differenz zwischen der Basispositionsabschätzung und der bekannten Position des Basisempfängers wird berechnet.

Eine anfängliche Positionsabschätzung wird berechnet für den mobilen bzw. beweglichen Empfänger unter Verwendung, zum Beispiel konventioneller GPS-Techniken mit offenem Ende oder differentiellen GPS-Techniken. Eine verfeinerte Positionsabschätzung wird berechnet für den mobilen Empfänger unter Verwendung eines Pseudoabstands von dem ersten Satelliten und Reichweiten von zwei anderen Satelliten. Eine zweite vektorielle Differenz bzw. Vektordifferenz zwischen der anfänglichen Positionsabschätzung und der verfeinerten Positionsabschätzung des mobilen Empfängers wird berechnet. Schließlich wird eine dritte Vektordifferenz zwischen der ersten Vektordifferenz und der zweiten Vektordifferenz berechnet. Die Position des ersten Empfängers wird präzise berechnet, indem man eine dritte Vektordifferenz zu der anfänglichen Positionsabschätzung für den mobilen Empfänger addiert.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung weist folgendes auf:

(a) Mittel, gekoppelt bzw. befestigt an den Basisempfänger, um eine Basispositionsabschätzung zu berechnen unter Verwendung eines Pseudoabstands von einem ersten Satelliten und Reichweiten von zwei anderen Satelliten und um eine erste Vektordifferenz zwischen der Basispositionsabschätzung und der bekannten Position des Basisempfängers zu berechnen;

(b) Mittel, um eine anfängliche Positionsabschätzung für den mobilen Empfänger zu berechnen;

(c) Mittel, gekoppelt bzw. befestigt an den mobilen Empfänger, um eine verfeinerte Positionsabschätzung für den mobilen Empfänger zu berechnen unter Verwendung eines Pseudoabstands von dem ersten Satelliten und Reichweiten von zwei anderen Satelliten und um eine zweite Vektordifferenz zwischen der anfänglichen Positionsabschätzung und der verfeinerten Positionsabschätzung des mobilen Empfängers zu berechnen; und

(d) Mittel, um eine dritte Vektordifferenz zwischen der ersten Vektordifferenz und der zweiten Vektordifferenz zu berechnen und um die dritte Vektordifferenz zu der anfänglichen Positionsabschätzung für den mobilen Empfänger zu addieren, um eine letzte Positionsabschätzung für den mobilen Empfänger zu erzeugen.

#### Kurze Beschreibung der Zeichnungen

Fig. 1 ist ein Diagramm, das die NAVSTAR GPS-Satelliten in ihren jeweiligen Orbits um die Erde darstellt;

Fig. 2 ist ein Diagramm, das ein autonomes Fahrzeugssystem, das eine Konstellation von vier GPS-Satelliten, ein Pseudolite, eine Basisstation und ein autonomes Fahrzeug aufweist;

Fig. 3 ist ein Blockdiagramm des autonomen Fahrzeugsystems, das im einzelnen das Fahrzeugpositioniersystem des autonomen Fahrzeugs darstellt;

Fig. 4 ist ein Blockdiagramm eines GPS-Verarbeitungssystems;

Fig. 5 ist ein Diagramm, das die geometrische Beziehung zwischen dem Erdmittelpunkt, einem Fahrzeug in der Nähe der Erdoberfläche und einer Konstellation von GPS-Satelliten zeigt;

Fig. 6A, 6B und 6C liefern ein detailliertes Flußdiagramm, das das erfindungsgemäße Verfahren darstellt, um eine präzise Positionsabschätzung unter Verwendung eines differentiellen GPS-Systems zu berechnen;

Fig. 7A und 7B liefern einen detaillierten Flußgraph bzw. Flußdiagramm, das eine Abtastmethode darstellt, um eine abgeschätzte Fahrzeugposition unter Verwendung einer differentiellen GPS-Technik zu berechnen;

Fig. 8 ist ein Diagramm, das die geometrische Beziehung zwischen einem Satelliten und einen erdgestützten Empfänger darstellt; und

Fig. 9 ist ein Flußdiagramm auf einer hohen Ebene, das das erfindungsgemäße Verfahren darstellt, um eine präzise Positionsabschätzung unter Verwendung eines differentiellen GPS-Systems zu berechnen.

#### Beste Betriebsart, um die Erfindung auszuführen

Die vorliegende Erfindung wird nun beschrieben unter Bezugnahme auf die Figuren, in denen gleiche oder ähnliche Bezugszeichen gleiche oder ähnliche Elemente/Schritte bezeichnen.

Die Erfindung ist ein differentielles System und ein Verfahren, um die Genauigkeit von Fahrzeugpositionsabschätzungen zu verbessern. In dem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird das NAVSTAR globale Positionierungssystem (GPS) verwendet. Wie oben diskutiert wurde und in Fig. 1 dargestellt ist, schließt das NAVSTAR GPS einundzwanzig betriebsbereite Satelliten 102 ein, die die Erde in sechs Orbits 104 umkreisen.

Die Erfindung wird beschrieben in der Umgebung eines autonomen Fahrzeugsystems 200, wie in Fig. 2 gezeigt ist. Eine repräsentative GPS-Konstellation 202 weist vier GPS-Satelliten  $SV_1$ — $SV_4$ , um die GPS-Daten zu übertragen, auf.

Ein Fahrzeug (zum Beispiel ein autonomer Bergbaulastwagen) 210 und eine Basisstation 220 sind geeignet, um die GPS-Daten/Navigationssignale von jedem GPS-Satelliten in der Konstellation zu empfangen unter Verwendung der jeweiligen GPS-Antennen 212 und 222.

Ein GPS-Empfänger kann die GPS-Navigationssignale von einem Satelliten, der sich "im Blickfeld" des Empfängers (d.h. Sichtlinienkommunikation) befindet, empfangen. Zum Beispiel "im Blickfeld" kann definiert werden als jeder Satellit, der sich mindestens  $10^\circ$  oberhalb des Horizonts befindet. Der  $10^\circ$ -Winkel sorgt für eine Pufferzone zwischen einem nützlichen Satelliten im Blickfeld und einem Satelliten, der gerade aus dem Blickfeld

unter dem Horizont verdeckt.

Eine "Konstellation" ist eine Gruppe von Satelliten, die aus dem "im Blick" befindlichen Satelliten eines GPS-Empfängers ausgewählt wird. Zum Beispiel vier Satelliten können aus einer Gruppe von sechs, die sich im Blick eines GPS-Empfängers befinden, ausgewählt werden. Diese vier Satelliten werden normalerweise ausgewählt aufgrund einer günstigen Geometrie für die Triangulierung (was weiter unten diskutiert wird).

Die Basisstation 220 weist einen GPS-Empfänger (d. h. einen Referenz- bzw. Bezugsempfänger) auf, der sich an einer bekannten, festen Position befindet. Die Basisstation 220 kommuniziert mit dem Fahrzeug 210 über den Kommunikationskanal 225.

Der Kommunikationskanal 225 repräsentiert die Kommunikationsverbindung zwischen der Basisstation 220 und dem Fahrzeug 210. In dem bevorzugten Ausführungsbeispiel weist der Kommunikationskanal 225 Radiosender/-empfänger auf. Der Kommunikationskanal 225 wird benutzt, um Daten zwischen der Basisstation 220 und dem Fahrzeug 210 zu übertragen.

Das System 200 kann optional eine oder mehrere Pseudolites 230 einschließen. Ein "Pseudolite" ist ein übertragendes System, das sich auf oder in der Nähe der Erdoberfläche befindet, das einen GPS-Satelliten nachahmt. Da ein Pseudolite eine feste bekannte Position besitzt, kann es in großem Maß die Positionsabschätzungen, die vom GPS abgeleitet werden, erhöhen. Um die Diskussion hier zu vereinfachen, wird nur auf GPS-Satelliten 102 (auf die ebenfalls als SV<sub>i</sub> oder Raumfahrzeug Bezug genommen wird) Bezug genommen. Es sollte jedoch verstanden werden, daß immer, wo Positionsdaten von einem Satelliten erforderlich sind, sie durch Daten eines Pseudolites ersetzt werden können.

Fig. 3 zeigt auf einer hohen Ebene ein Blockdiagramm des erfindungsgemäßen Systems 200, einschließlich der GPS-Satelliten 102, dem Fahrzeug 210, der Basisstation 220 und den Pseudolites 230. Das Fahrzeug 210 schließt ein Fahrzeugpositionierungssystem (VPS) 310 und ein Navigationssystem 320 ein.

#### Das Fahrzeugpositionierungssystem (VPS) 310

Die Aufgabe, das Fahrzeug 210 entlang eines vorgeschriebenen Pfads zu führen, macht unter anderem eine genaue Abschätzung der aktuellen Position des Fahrzeugs bezüglich eines Bezugspunktes erforderlich. Ist einmal die aktuelle Position bekannt, kann man dem Fahrzeug 210 befehlen, zu seinem nächsten Bestimmungsort voranzuschreiten. Das VPS 310 erlaubt, daß die Positionsabschätzung des Fahrzeugs 210 mit einer extremen Präzision bestimmt werden.

Das VPS 310 weist ein GPS-Verarbeitungssystem 312, ein Bewegungspositionierungssystem (MPS) 314 und ein VPS-Verarbeitungssystem 324 auf. Das GPS-Verarbeitungssystem 312 empfängt die GPS-Daten, d. h. Navigationssignale, von den GPS-Satelliten 102 und eine Fahrzeuggeschwindigkeit vom MPS 314 und berechnet eine erste Positionsabschätzung (FPE) für das Fahrzeug 210 daraus. Das MPS 314 weist einen Fahrzeugkilometerzähler 316 und eine Trägheitsreferenzeinheit (IRU) 318 auf, die die Position des Fahrzeugs verfolgen auf der Grundlage von Veränderungen von einer anfänglichen bekannten Position. Das MPS 314 erzeugt (die tatsächlichen Berechnungen werden in dem VPS-Verarbeitungssystem 324 gemacht) eine zweite Positionabschätzung (SPE) für das Fahrzeug 210.

Während die ersten und zweiten Positionsabschätzungen unabhängig voneinander abgeleitet werden können, verwendet die vorliegende Erfindung Daten vom MPS 314, um die Präzision der ersten Positionsabschätzung zu verbessern. Dies wird im Detail weiter unten beschrieben. Die erste Positionabschätzung (vom GPS) kann als eine unabhängige Anzeige der Position des Fahrzeugs 210 verwendet werden. Ähnlich kann die zweite Positionsabschätzung (vom MPS) als eine unabhängige Anzeige der Position des Fahrzeugs 210 verwendet werden. Jedoch werden in bevorzugten Ausführungsbeispielen die ersten und zweiten Positionsabschätzungen kombiniert durch das VPS-Verarbeitungssystem 324 (wie weiter unten diskutiert wird), um eine genauere dritte oder beste Positionsabschätzung (BPE) zu erzeugen.

#### Das Navigationssystem 320

Das Navigationssystem 320 empfängt die beste Positionsabschätzung vom VPS 314. Das Navigationssystem 320 verwendet diese präzise, beste Positionsabschätzung, um das Fahrzeug 210 genau zu navigieren.

#### Das GPS-Verarbeitungssystem 312

Das GPS-Verarbeitungssystem 312 ist das Herz des Systems 200. Unter Bezugnahme auf die Fig. 4, weist das GPS-Verarbeitungssystem 312 ein Empfängersystem 400 und einen GPS-Prozessor 408 auf. Das Empfängersystem 400 empfängt und decodiert die Navigationssignale von den Satelliten. Der GPS-Prozessor 408 verwendet dann die Information von dem Empfängersystem 400, um die erste Positionsabschätzung zu berechnen.

Das Empfängersystem 400 weist eine GPS-Antenne 402, einen Vorverstärker 404 und einen GPS-Empfänger 406 auf. Die Antenne 402 ist geeignet, um elektromagnetische Strahlung in dem Radiobereich des Spektrums zu empfangen. Der Vorverstärker 404 verstärkt ein GPS-Navigationssignal, das von der GPS-Antenne 402 empfangen wurde, von einem ausgewählten GPS-Satelliten. Der GPS-Empfänger 406 ist ein Vielkanalempfänger, der die GPS-Navigationssignale decodiert und ein Pseudoabstand und eine Satellitenposition für jeden ausgewählten Satelliten erzeugt. Der GPS-Prozessor 408 verwendet die Pseudoabstände und Satellitenposition für eine Vielzahl von Satelliten, um die erste Positionsabschätzung für das Fahrzeug 210 zu berechnen.

In dem bevorzugten Ausführungsbeispiel sind die Antenne 402 und der Vorverstärker 404 in einer einzelnen Einheit integriert. Die kombinierte Antenne/Vorverstärker 402/404 und der Empfänger 406 sind zusammen unter der Teilnummer MX4200 von Magnavox Advanced Products und Systems Co., Torrance, Kalifornien,

erhältlich. Der GPS-Prozessor 408 weist einen MC68020 Mikroprozessor, erhältlich von Motorola, Inc., Schaumburg, Illinois, auf.

Der Empfänger 406 berechnet einen Pseudoabstand für jeden Satelliten wie folgt. Wie oben beschrieben wurde, wird jedes Signal, das von einem GPS-Satelliten übertragen wird, ständig bzw. kontinuierlich mit der exakten Zeit codiert, an dem das Signal übertragen wurde. Indem man die Zeit, an dem das Signal an dem Empfänger 406 empfangen wurde, notiert bzw. feststellt, kann eine Ausbreitungszeitverzögerung berechnet werden. Diese Zeitverzögerung, wenn sie mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signales ( $2,9979245998 \times 10^8$  m/s) multipliziert wird, ergibt den Pseudoabstand von dem übertragenden Satelliten zum Empfänger. Wie oben diskutiert wurde, wird der Abstand ein "Pseudoabstand" genannt, weil die Empfängeruhr nicht präzise mit der GPS-Zeit synchronisiert ist (was einen Uhrenfehler verursacht) und weil die Ausbreitung durch die verschiedenen Schichten der Atmosphäre Veränderungen in der Geschwindigkeit der sich ausbreitenden Signale (was einen atmosphärischen Fehler verursacht).

Der GPS-Empfänger 406 kann einen Almanach oder Kalender benutzen, um grob die Position eines Satelliten (zum Beispiel für Akquirierungszwecke) zu bestimmen. Für eine genauere Bestimmung der Satellitenposition decodiert der Empfänger das GPS-Navigationssignal und extrahiert daraus die ephemerischen Daten. Die ephemerischen Daten zeigen die präzise Position des übertragenden Satelliten an.

Zusätzlich zu dem Berechnen der Übertragungszeitverzögerungen kann der GPS-Empfänger 406 Pseudoabstände berechnen unter Verwendung von akkumulierten Delta-Bereichen bzw. Delta-Reichweiten (ADR)-Techniken oder Trägertechniken. Ein ADR wird berechnet, indem man die Phase der Trägerwelle des GPS-Navigationssignals verfolgt. Wenn ein Satellit und ein GPS-Empfänger sich voneinander weg bewegen, kann die Zunahme an Distanz notiert bzw. festgestellt werden als eine Phasenveränderung in der GPS-Trägerwelle. Weil die GPS-Trägerwelle eine kontinuierliche Sinusform besitzt, ist ein ADR keine absolute Reichweite bzw. Abstand. Ein ADR ist eher eine relative Veränderung in der Distanz zwischen dem Satelliten und dem Empfänger. Daher ergibt diese Technik eine "Delta"-Reichweite.

ADR-Techniken können verwendet werden, um sehr genaue Pseudoabstände zu berechnen. Wenn der Ausdruck "Pseudoabstand" hier benutzt wird, wird auf einen Pseudoabstand Bezug genommen, der berechnet wird unter Verwendung von entweder ADR-Techniken oder Übertragungszeitverzögerungstechniken.

#### Kalman-Filtern

Von der Perspektive eines Anwenders, ist das GPS-Verarbeitungssystem 312 der wichtigste Teil des autonomen Fahrzeugsystems 200. Das GPS-Verarbeitungssystem 312 ist verantwortlich, die Signale von jedem GPS-Satelliten zu empfangen, die optimalen Satelliten für die Verarbeitung auszuwählen, die präzise Position von jedem einzelnen ausgewählten Satelliten zu bestimmen, den Pseudoabstand zu jedem Satelliten zu bestimmen, und schließlich, um die Position des Empfängers auf der Grundlage der Satellitenposition und der Pseudoabstände abzuschätzen. Das alles muß getan werden unter Verwendung der empfangenen Daten (von im hohen Maße abgeschwächten Amplituden), die sehr häufig stark mit Rauschen verfälscht sind (einschließlich Rauschen, das von der Atmosphäre, dem Vorverstärker und dem Empfänger erzeugt wurde). Das GPS-Verarbeitungssystem 312 verläßt sich in hohem Maß auf Kalman-Filtern, um das Rauschen von den GPS-Navigationssignalen zu eliminieren.

Der Kalman-Filter ist ein rekursiver Algorithmus nach der Methode der kleinsten Quadrate, der normalerweise über Software oder Firmware auf einen digitalen Computer (Prozessor 408) implementiert ist. In einem bevorzugten Ausführungsbeispiel nimmt der Kalman-Filter an, daß die verrauschten Signale eher diskreter als kontinuierlicher Natur sind. Sowohl die Daten als auch das Rauschen werden in Vektorform modelliert und die Daten werden rekursiv verarbeitet.

Ein Kalman-Filter leistet zwei Funktionen bzw. Aufgaben. Zuerst extrapoliert er eine Datenabschätzung aus vergangenen bzw. früheren Daten. Zweitens bringt er auf den neuesten Stand (update) und verfeinert die extrapolierte Datenabschätzung auf der Grundlage von aktuellen Daten. Zum Beispiel, falls eine Fahrzeugposition  $P_1$  und eine Geschwindigkeit  $v_1$  zu einer Zeit  $t_1$  bekannt sind, dann wird der Filter (indem er den Extrapolationsschritt ausführt)  $p_1$  und  $v_1$  dazu verwenden, um eine Position  $p_2$  zu einer Zeit  $t_2$  abzuschätzen. Danach (indem er den auf den neuesten Stand bring- oder update-Schritt ausführt), werden die neu akquirierten Daten zur Zeit  $t_2$  dazu verwendet, die Positionsabschätzung  $p_2$  zu verfeinern. Von Daten, die in den Kalman-Filter eingespeist werden, um entweder bei dem Extrapolations- oder dem Update-Schritt zu helfen, sagt man, daß sie den Filter "einschränken".

Kalman-Filtern ist in der Technik gut bekannt. Für eine detailliertere Diskussion über Kalman-Filtern, siehe Brown, R. G., "Kalman Filtering: A Guided Tour," Iowa State University; und Kao, Min H und Eller, Donald H., "Multiconfiguration Kalman Filter Design for High-Performance GPS Navigation," IEEE Transactions on Automatic Control, Band AC-28, Nr. 3, März 1983, von denen die relevanten Lehren hier durch die Bezugnahme auf genommen wurden.

Gewöhnlicherweise, da der Kalman-Filter ein linearer Filter ist, werden die oben dargelegten Abstands- bzw. Distanzgleichungen nicht direkt gelöst, sondern werden zuerst linearisiert. Das heißt, die Gleichungen werden abgeleitet bzw. differenziert und die Ableitung von jeder Gleichung wird gelöst bzw. aufgelöst, um eine Veränderung von einer zuletzt bekannten Position zu berechnen. Zum Beispiel kann eine erste Positionsabschätzung zu einer Zeit  $t_i$  schnell berechnet werden von dem GPS-Prozessor 410, indem man die Navigationsgleichungen differenziert und nach einer Veränderung in der Position ( $\Delta x_v, \Delta y_v, \Delta z_v$ ) von einer zuletzt bekannten Fahrzeugposition  $(x_v, y_v, z_v)_{i-1}$  zu einer Zeit  $t_{i-1}$  auflöst. Dies vereinfacht in großem Maße die Lösung der Abstandsgleichungen.

Als eine Alternative zu Kalman-Filtern kann eine Abschätzung nach der Methode der kleinsten Quadrate



oder der am besten passenden Polynomialfit verwendet werden.

#### Das Bewegungspositionierungssystem (MPS) 314

Wie oben diskutiert wurde, weist das MPS 314 einen Fahrzeugkilometerzähler 316 und eine Trägheitsreferenzeinheit bzw. Trägheitsbezugseinheit (IRU) 318 auf, die die Position des Fahrzeugs verfolgt auf der Grundlage von Veränderungen von einer anfangs bekannten Position. Der Fahrzeugkilometerzähler 316 erzeugt Daten über die Distanz bzw. den Abstand, der von dem Fahrzeug 210 zurückgelegt wurde. Die IRU 318 weist Lasergyroskop(e) 320 und/oder Beschleunigungsmesser 322 auf, die verwendet werden können, um Positions-, Geschwindigkeits-, Drehung-Neigung und Gierungsdaten zu erzeugen. Das MPS 314 liefert die IRU-Daten und die Kilometerzählerdaten an das VPS-Verarbeitungssystem 324. Ein MPS-Inter-Kommunikationsprozessor 326 kontrolliert bzw. steuert das Format der MPS-Daten, die dem VPS-Verarbeitungssystem 324 zur Verfügung gestellt werden. Aus diesen Daten erzeugen die VPS-Verarbeitungssysteme 324 eine zweite Positionsabschätzung für das Fahrzeug 210.

#### Das VPS-Verarbeitungssystem 324

Wie oben erwähnt wurde, kann die erste Positionsabschätzung vom GPS als eine unabhängige Anzeige der Position des Fahrzeugs 210 verwendet werden. Ähnlich kann die zweite Positionsabschätzung, die aus den MPS-Daten berechnet wurde, als eine unabhängige Anzeige der Position des Fahrzeugs 210 verwendet werden. Jedoch werden in dem bevorzugten Ausführungsbeispiel die ersten und zweiten Positionsabschätzungen kombiniert durch das VPS-Verarbeitungssystem 324, um eine genauere dritte oder beste Positionsabschätzung zu erzeugen. Um dies zu erreichen, verläßt sich das VPS-Verarbeitungssystem auf Kalman-Filtern und auf gewichtetes Mitteln, um optimal die Daten von dem GPS-Verarbeitungssystem 312 mit den Daten des MPS 314 zu kombinieren.

Der GPS-Prozessor 408 berechnet die erste Positionsabschätzung unter Verwendung der Pseudoabstände und der Satellitenposition von dem GPS-Empfänger 406. Dies ist weiter unten beschrieben unter Bezugnahme auf die Fig. 5.

Fig. 5 zeigt eine beispielhafte Satellitenkonstellation 202, die die GPS-Satelliten SV<sub>1</sub>—SV<sub>4</sub> im Blickfeld des Fahrzeugs 210 zeigt. In kartesischen Koordinaten mit Bezug auf den Erdmittelpunkt, befindet sich der Satellit SV<sub>1</sub> an der Stelle (x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>, z<sub>1</sub>); der Satellit SV<sub>2</sub> an der Stelle (x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>, z<sub>2</sub>); der Satellit SV<sub>3</sub> an der Stelle (x<sub>3</sub>, y<sub>3</sub>, z<sub>3</sub>); der Satellit SV<sub>4</sub> an der Stelle (x<sub>4</sub>, y<sub>4</sub>, z<sub>4</sub>); und das Fahrzeug 210 befindet sich an der Stelle (x<sub>v</sub>, y<sub>v</sub>, z<sub>v</sub>).

Die kartesischen (x, y, z)-Koordinaten von jedem Satelliten werden bestimmt von dem GPS-Empfänger 406 unter Verwendung der ephemerischen Daten der Satelliten. Die Pseudoabstände (PSR<sub>1</sub>, PSR<sub>2</sub>, PSR<sub>3</sub> und PSR<sub>4</sub>) zwischen dem Fahrzeug 210 und jedem Satelliten werden von dem GPS-Empfänger 406 bestimmt unter Verwendung von Übertragungszeitverzögerungen. Ist diese Information für mindestens vier Satelliten gegeben, kann der Ort des Fahrzeugs 210 (d. h. des Empfängers 406) bestimmt werden unter Verwendung der folgenden vier Abstandsgleichungen:

$$(x_1 - x_v)^2 + (y_1 - y_v)^2 + (z_1 - z_v)^2 = (PSR_1 - B_{\text{clock}})^2$$

$$(x_2 - x_v)^2 + (y_2 - y_v)^2 + (z_2 - z_v)^2 = (PSR_2 - B_{\text{clock}})^2$$

$$(x_3 - x_v)^2 + (y_3 - y_v)^2 + (z_3 - z_v)^2 = (PSR_3 - B_{\text{clock}})^2$$

$$(x_4 - x_v)^2 + (y_4 - y_v)^2 + (z_4 - z_v)^2 = (PSR_4 - B_{\text{clock}})^2$$

wobei:  $B_{\text{clock}} = B_{\text{Uhr}} = \text{Uhrenfehler}$ .

Der "Uhrenfehler" ist ein Korrekturfaktor nullter Ordnung, der grob den oben diskutierten Uhrenfehler kompensiert.

Man beachte, daß es in diesen Gleichungen vier Unbekannte gibt: x<sub>v</sub>, y<sub>v</sub>, z<sub>v</sub> und B<sub>Uhr</sub>. Man beachte ebenso, daß jeder Satellit eine Gleichung erzeugt. Somit haben wir vier Satelliten und vier Unbekannte, was erlaubt, die Gleichungen nach dem Uhrenfehler (B<sub>Uhr</sub>) und der Position (x<sub>v</sub>, y<sub>v</sub>, z<sub>v</sub>) des Fahrzeugs 210 aufzulösen.

Falls der Uhrenfehler (B<sub>Uhr</sub>) eliminiert wird, bleiben nur drei Variable in der Gleichung übrig, so daß nur drei Satelliten notwendig sind, um nach der Position des Fahrzeugs 210 aufzulösen. Der Uhrenfehler kann eliminiert werden, falls eine Uhr mit hoher Genauigkeit (d. h. eine Atomuhr) in dem Empfängersystem 400 benutzt wird.

Man beachte, daß die Genauigkeit der ersten Positionsabschätzung in hohem Maß von den Pseudoabständen abhängt, die von dem Empfänger 406 berechnet wurden. Wie oben diskutiert wurde, können diese Pseudoabstände in großem Maß verfälscht sein von atmosphärischen Effekten, der selektiven Verfügbarkeit, Vielpfad (Reflektionen) und Uhrenfehlern. Eine differentielle Korrektur unter Verwendung der Basisstation 220 wird diese Fehler reduzieren.

#### Die Basisstation 220

GPS-Daten von der Konstellation 202 von GPS-Satelliten 102 werden ebenfalls von der Basisstation 220 empfangen. Die Basisstation 220 weist ein externes Verarbeitungssystem (host processing system) 328 auf. Das externe Verarbeitungssystem 328 ist ähnlich zu dem GPS-Verarbeitungssystem 312 des Fahrzeugs 210 darin,

daß es einen GPS-Empfänger (zum Beispiel ein Magnavox-Modell MX4818) enthält, um die Position der Basisstation bezüglich des Erdmittelpunkts zu bestimmen. Die Basisstation wird verwendet, um ein "differentielles GPS-System" zu realisieren.

In einem differentiellen System werden GPS-Navigationssignale, die an der Basisstation empfangen wurden, verwendet in Verbindung mit der bekannten Position der Basisstation, um Fehler bzw. Abweichungen zu berechnen. Die Basisstation kann Fehler auf eine Vielzahl von Arten berechnen. In einem bekannten Verfahren (im Detail weiter unten beschrieben unter Bezugnahme auf die Fig. 7), wird ein mit dem GPS berechneter Pseudoabstand von jedem Satelliten mit einer berechneten Reichweite (R) zwischen dem Satelliten einer bekannten Position der Basisstation 220 berechnet. Man beachte, daß der Ausdruck "Reichweite" nach seinem Gebrauch hier ein berechneter Abstand zwischen zwei Endpunkten ist. Zum Beispiel werden die Reichweite (R), zwischen dem Satelliten bei einer Position (x, y, z) und der Basisstation bei einer Position (x<sub>B</sub>, y<sub>B</sub>, z<sub>B</sub>) berechnet unter Verwendung der Standard 3D (drei-dimensionalen) Abstandsgleichung:

$$(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + (z - z_B)^2 = R^2$$

Die Position (x, y, z) des Satelliten wird aus den ephemerischen Daten des Satelliten bestimmt.

Die Differenz zwischen dem mit dem GPS berechneten Pseudoabstand und dem berechneten Abstand ist eine "differentielle Abweichung", der von atmosphärischen Fehlern, Uhrenfehlern, Fehlern auf Grund der selektiven Verfügbarkeit (SA), Satellitenpfadverschiebung, Empfängerrauschen etc. verursacht wurde. Die Basisstation berechnet einen Fehler für jeden Satelliten, der für die Positionsrechnungen verwendet wurde. Diese Fehler, wenn sie dem Fahrzeug über den Kommunikationskanal 225 mitgeteilt werden, können verwendet werden, um die Genauigkeit der ersten Positionsabschätzung zu verbessern.

Das differentielle GPS-System nimmt an, daß das Fahrzeug 210 sich relativ nahe zur Basisstation 220, zum Beispiel innerhalb von 40 km, befindet, so daß die atmosphärischen Fehler, die an der Basisstation 220 vorhanden sind, ungefähr dieselben wie die atmosphärischen Fehler, die an dem Fahrzeug 210 vorhanden sind, sind. Dies erlaubt dem Fahrzeug zu verbessern, d. h. die Genauigkeit zu erhöhen, der ersten Positionsabschätzung des Fahrzeugs, auf der Grundlage von Information, die an der Basisstation erzeugt wurde.

Bekannte differentielle Techniken sowie die oben beschriebenen, sind wirksam, um relativ genaue Positionsabschätzungen (zum Beispiel bis auf innerhalb von zehn Metern) zu erzeugen. Jedoch ist eine größere Genauigkeit nicht ständig verfügbar von den bekannten Systemen, weil die differentiellen Fehler einige gewisse restliche Fehler erzeugen. Der restliche Fehler rührt teilweise von der Annahme her, daß der Uhrenfehler an der Basisstation linear variiert oder, mit anderen Worten, die Uhrenfehlerrate konstant ist. Diese Annahme hat ein Glätten des Uhrenfehlers der Basisstation zur Folge. Ähnlich nimmt man an, daß der Uhrenfehler an dem Fahrzeug linear variiert. So führt der Uhrenfehler an dem Fahrzeug ebenfalls einen Fehler in die Positionsrechnungen ein.

Bekannte differentielle Techniken sind einem zusätzlichen Fehler bzw. Irrtum unterworfen, der von einer Zeitverzögerung zwischen der Berechnung der differentiellen Fehler und dem Empfang und der Verwendung dieser Fehler durch das Fahrzeug verursacht wird. Wenn diese Zeitverzögerung ansteigt, dann steigt die Ungenauigkeit der differentiellen Fehler an. Außerdem können die differentiellen Systeme nicht Reflektionen korrigieren. Reflektionen (d. h. Vielpfadsignale) haben eine Berechnung von ungenauen Pseudoabständen zur Folge.

Schließlich machen bekannte differentielle Systeme erforderlich, daß derselbe Satellit verwendet wird sowohl am Fahrzeug als auch der Basisstation. Jedoch, wie oben diskutiert wurde, ist diese Bedingung nicht immer möglich auf Grund von Abschattungseffekten.

Die Erfindung ist ein differentielles GPS-System und ein Verfahren, fähig um extrem präzise Fahrzeugpositionsabschätzungen zu berechnen. Unter der einzigen Annahme, daß keine Reflektionen (Vielpfadfehler) an der Basisstation vorliegen, werden alle anderen Fehler wesentlich eliminiert. Uhrenfehler sowohl am Fahrzeug und der Basisstation werden präzise korrigiert. Zusätzlich werden Fehler, die durch Reflektionen verursacht wurden und an dem Fahrzeug auftreten, und Basis/Fahrzeug-Verzögerungszeitprobleme, die mit dem bekannten differentiellen System assoziiert sind, eliminiert. Außerdem muß nur ein gemeinsamer Satellit sowohl für die Basisstation und dem Fahrzeug zugänglich bzw. verfügbar sein.

Die Erfindung basiert auf der Grundlage bzw. Prämisse, daß eine eindeutige Fahrzeugposition P<sub>V</sub> existiert; so daß der Vektorpositionsfehler zwischen P<sub>V</sub> und P<sub>V'</sub> äquivalent zu dem Vektorpositionsfehler zwischen einer geschätzten Basisstation P<sub>B'</sub> und der bekannten Position P<sub>B</sub> der Basisstation ist (Man beachte, daß P<sub>V'</sub> erwartungsgemäß gegen P<sub>V</sub> konvergiert.) Dies wird mathematisch folgendermaßen ausgedrückt:

$$\exists P_V, \text{ so daß } [P_V'' - P_V'] = [P_{B'} - P_B]$$

wobei gilt:

P<sub>V</sub> ist die tatsächliche Fahrzeugposition (x<sub>V</sub>, y<sub>V</sub>, z<sub>V</sub>)

P<sub>V'</sub> ist die geschätzte Fahrzeugposition (x<sub>V'</sub>, y<sub>V'</sub>, z<sub>V'</sub>), die, wie weiter unten diskutiert wird, berechnet wurde,

P<sub>V''</sub> ist die verfeinerte Fahrzeugpositionsabschätzung (x<sub>V''</sub>, y<sub>V''</sub>, z<sub>V''</sub>) (berechnet, wie weiter unten diskutiert wird) und konvergiert erwartungsgemäß gegen P<sub>V</sub>.

P<sub>B</sub> ist die tatsächlich bekannte Position (x<sub>B</sub>, y<sub>B</sub>, z<sub>B</sub>) der Basisstation, und

P<sub>B'</sub> ist die geschätzte Position (x<sub>B'</sub>, y<sub>B'</sub>, z<sub>B'</sub>) der Basisstation, die berechnet wurde, wie weiter unten diskutiert wird.

Im wesentlichen berechnet die Erfindung einen Positionsoffset bzw. eine -verschiebung, der vom Pseudoabstands- und ephemerischen Fehlern, von einem einzelnen Satelliten sowohl am Fahrzeug als auch auf der



Basisstation resultiert, indem man den Offset, der in der Basisstation auftritt, von dem Offset, der in dem Fahrzeug auftritt, subtrahiert, kann ein präziser Fahrzeugpositionsoffset berechnet werden. Diese präzise Position des Fahrzeugs wird berechnet, indem man diesen Offset zu der anfänglichen Fahrzeugpositionsabschätzung addiert. Dieses Verfahren ist in dem Flußdiagramm auf hoher Ebene der Fig. 9 dargestellt.

Die Fig. 9 zeigt ein erfindungsgemäßes Verfahren 900. In einem Schritt 902 wird eine Positionsabschätzung ( $P_B$ ) für die Basisstation berechnet unter Verwendung eines Pseudoabstands von einem ersten Satelliten ( $SV_1$ ) und Reichweiten von zwei anderen Satelliten. In einem Schritt 904 wird die bekannte Position ( $P_B$ ) der Basisstation von der Basispositionsabschätzung  $P_B$  subtrahiert, um einen Basisfehlervektor zu erzeugen:

$$\bar{E}_B$$

Eine anfängliche Positionsabschätzung ( $P_V$ ) für das Fahrzeug wird berechnet oder abgeschätzt unter Verwendung bekannter Techniken (zum Beispiel unter Verwendung einer GPS-Technik mit offenem Ende oder einer differentiellen GPS-Technik) in einem Schritt 906. In einem Schritt 908 wird eine verfeinerte Positionsabschätzung ( $P_V'$ ) für das Fahrzeug berechnet unter Verwendung eines Pseudoabstands von dem Satelliten  $SV_1$  und Reichweiten von zwei anderen Satelliten. Man beachte, wie im Detail weiter unten diskutiert wird, daß die Basisstation und das Fahrzeug nur einen Satelliten  $SV_1$  als einen gemeinsamen Satelliten verwenden können. Indem man nur einen Pseudoabstand berechnet, beschränkt das erfindungsgemäße Verfahren wesentlich die Fehlerquellen gegenüber denen eines einzelnen Satelliten. Diese einzelnen Quellenfehler werden dann durch das erfindungsgemäße Verfahren im wesentlichen eliminiert. Die "zwei anderen Satelliten" brauchen nicht gemeinsam sowohl für die Basis als auch das Fahrzeug verwendet werden. Jedoch, wie weiter unten diskutiert wird, ist es bevorzugt, daß drei gemeinsame Satelliten verwendet werden, um eine präzise Positionierung zu erreichen.

In einem Schritt 910 wird die anfängliche Fahrzeugabschätzung  $P_V$  von der neuen Positionsabschätzung  $P_V'$  subtrahiert, um einen Fahrzeugfehlervektor zu erzeugen:

$$\bar{E}_V$$

Schließlich in einem Schritt 912 wird die letzte Fahrzeugposition (Abschätzung)  $P_V$  berechnet, indem man die Differenz zwischen dem Fahrzeugfehlervektor und dem Basisfehlervektor zu der anfänglichen Fahrzeugpositionsabschätzung ( $P_V$ ) addiert. Dies ist in der folgenden Gleichung dargestellt:

$$P_V = P_V' + \bar{E}_V - \bar{E}_B$$

Man beachte, daß die anfängliche Positionsabschätzung  $P_V$  verwendet wird, um eine verfeinerte Positionsabschätzung  $P_V'$  unter Verwendung eines Pseudoabstands von nur einem Satelliten zu berechnen. Danach fällt  $P_V$  aus der Gleichung, da

$$\bar{E}_V$$

gleich  $P_V' - P_V$  ist. Die resultierende Gleichung ist:

$$P_V = P_V'' - \bar{E}_B$$

Der Betrieb eines beispielhaften Ausführungsbeispiels 600 des erfindungsgemäßen differentiellen Verfahrens wird nun unter Bezugnahme auf die Fig. 6A, 6B und 7 beschrieben. In einem Schritt 602 wird eine geschätzte Fahrzeugposition ( $P_V = x_V, y_V, z_V$ ) berechnet. In einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung, wird  $P_V$  berechnet gemäß dem differentiellen Verfahren 700, das in Fig. 7 dargestellt ist und weiter unten diskutiert wird. Jedoch ist dies nicht erforderlich. Tatsächlich kann  $P_V$  beliebig bestimmt werden. Solch eine beliebige Abschätzung wird jedoch die Genauigkeit reduzieren, da sie die Genauigkeit der Annahme, die weiter unten gemacht wird, nämlich daß der Winkel  $\alpha$  sehr nahe an Null ist (siehe Fig. 8) verringert.

In einem Schritt 604 werden Navigationssignale an der Basisstation von drei Satelliten  $SV_1$ ,  $SV_2$ , und  $SV_3$  empfangen. Bei einem Schritt 606 wird eine Satellitenposition ( $x_i, y_i, z_i$ ) berechnet für jeden Satelliten unter Verwendung der ephemerischen Daten und der GPS-Zeit. In einem Schritt 608 werden ein Pseudoabstand ( $PSR_{1B}$ ) zwischen der Basisstation und dem Satelliten  $SV_1$  berechnet, wie oben diskutiert wurde. In einem Schritt 610 wird eine Reichweite ( $R_{2B}$ ) zwischen der bekannten Position ( $x_B, y_B, z_B$ ) der Basisstation und der Position ( $x_2, y_2, z_2$ ) von dem  $SV_2$  berechnet unter Verwendung der 3-D-Abstandsgleichung. In einem Schritt 612 wird eine Reichweite ( $R_{3B}$ ) zwischen der bekannten Position ( $x_B, y_B, z_B$ ) der Basisstation und der Position ( $x_3, y_3, z_3$ ) des  $SV_3$  berechnet unter Verwendung der dreidimensionalen Abstandsgleichung.

Der Pseudoabstand  $PSR_{1B}$  und die beiden Reichweiten  $R_{2B}$  und  $R_{3B}$  werden verwendet, um eine abgeschätzte Position ( $x_B, y_B, z_B$ ) der Basisstation in einem Schritt 614 zu berechnen. Dies wird durchgeführt durch das Lösen der folgenden Gleichungen:

$$(x_1 - x_B')^2 + (y_1 - y_B')^2 + (z_1 - z_B')^2 = \text{PSR}_{1B}^2$$

$$(x_2 - x_B')^2 + (y_2 - y_B')^2 + (z_2 - z_B')^2 = R_{2B}^2$$

$$5 \quad (x_3 - x_B')^2 + (y_3 - y_B')^2 + (z_3 - z_B')^2 = R_{3B}^2$$

In einem Schritt 616 wird die abgeschätzte Basisposition ( $P_B$ ) mit der tatsächlichen Basisposition ( $P_B$ ) verglichen, um einen Basisfehlervektor zu erzeugen, der die Vektordifferenz zwischen den zwei Positionen darstellt:

$$10 \quad \begin{aligned} \bar{E}_{1B} &= (x_B' - x_B), (y_B' - y_B), (z_B' - z_B) \\ &= (x_B, y_B, z_B)_{1B} \end{aligned}$$

15 Das Verfahren schreitet dann zu einem Schritt 617 fort. Man beachte, daß die Schritte 617—626, die an dem Fahrzeug durchgeführt werden, ähnlich zu den entsprechenden Schritten 604—616 sind, die an der Basisstation durchgeführt werden. In einem Schritt 617 werden Navigationssignale an dem Fahrzeug von drei Satelliten  $SV_1$ ,  $SV_2$  und  $SV_3$  empfangen. In einem Schritt 618 wird eine Satellitenposition ( $x_i, y_i, z_i$ ) berechnet für jeden Satelliten unter Verwendung der ephemerischen Daten und der GPS-Zeit. In einem Schritt 619 wird ein Pseudoabstand ( $\text{PSR}_{1V}$ ) zwischen dem Fahrzeug und dem Satelliten  $SV_1$  berechnet, wie oben diskutiert wurde. In einem Schritt 620 wird eine Reichweite ( $R_{2V}$ ) zwischen der abgeschätzten Position ( $x_v, y_v, z_v$ ) des Fahrzeugs und der Position ( $x_2, y_2, z_2$ ) des  $SV_2$  berechnet unter Verwendung der 3-D-Abstandsgleichung. In einem Schritt 622 wird eine Reichweite ( $R_{3V}$ ) zwischen der geschätzten Position ( $x_v, y_v, z_v$ ) des Fahrzeugs und der Position ( $x_3, y_3, z_3$ ) des  $SV_3$  berechnet unter Verwendung der 3-dimensionalen Abstandsgleichung.

25 Der Pseudoabstand  $\text{PSR}_{1V}$  und die zwei Reichweiten  $R_{2V}$  und  $R_{3V}$  werden verwendet, um eine neue oder verfeinerte abgeschätzte Position ( $x_v'', y_v'', z_v''$ ) des Fahrzeugs in einem Schritt 624 zu berechnen. Dies wird durchgeführt durch das Lösen der folgenden Gleichung:

$$(x_1 - x_v'')^2 + (y_1 - y_v'')^2 + (z_1 - z_v'')^2 = \text{PSR}_{1V}^2$$

$$30 \quad (x_2 - x_v'')^2 + (y_2 - y_v'')^2 + (z_2 - z_v'')^2 = R_{2V}^2$$

$$(x_3 - x_v'')^2 + (y_3 - y_v'')^2 + (z_3 - z_v'')^2 = R_{3V}^2$$

35 In einem Schritt 626 wird die verfeinerte abgeschätzte Fahrzeugposition ( $P_v''$ ) mit der anfänglich abgeschätzten Fahrzeugposition ( $P_v$ ) verglichen, um einen Fahrzeugfehlervektor

$$40 \quad \begin{aligned} \bar{E}_{1V} &= (x_v'' - x_v'), (y_v'' - y_v'), (z_v'' - z_v') \\ &= (x_B, y_B, z_B)_{1V} \end{aligned}$$

der eine Vektordifferenz zwischen den zwei Positionen repräsentiert, zu erzeugen. Als nächstes werden der Basisfehlervektor

$$45 \quad \bar{E}_{1B}$$

und der Fahrzeugfehlervektor

$$50 \quad \bar{E}_{1V}$$

verglichen in einem Schritt 628, um einen Fahrzeugpositionsfehlervektor

$$55 \quad \bar{P}_{\text{ERROR}}$$

zu erzeugen,  
wobei

$$60 \quad \begin{aligned} \bar{P}_{\text{ERROR}} &= \bar{E}_{1V} - \bar{E}_{1B} \\ 65 \quad &= (x_v'' - x_v' - x_B' + x_B), (y_v'' - y_v' - y_B' + y_B), (z_v'' - z_v' - z_B' + z_B) \end{aligned}$$

Schließlich in einem Schritt 630 wird die tatsächliche Fahrzeugposition ( $x_v, y_v, z_v$ ) berechnet, indem man

$$\vec{P}_{\text{Fehler}} = \vec{P}_{\text{Error}}$$

Zu der anfänglich abgeschätzten Fahrzeugposition ( $x_v, y_v, z_v$ ) hinzuaddiert. Dies hat eine präzise berechnete Fahrzeugposition zur Folge, die verwendet werden kann als erste Positionsabschätzung in dem Fahrzeugpositioniersystem 310. 5

Da die Genauigkeit der ersten Positionsabschätzung, die gemäß dieses Verfahrens berechnet wurde, in hohem Maße genau sein wird, kann sie alternativ und wichtig als beste Positionsabschätzung für das Navigieren des Fahrzeugs 210 verwendet werden, ohne Eingabe vom Bewegungspositionssystem 314. 10

Wie oben diskutiert wurde, wird  $P_v$  des Schritts 602 berechnet gemäß dem differentiellen Verfahren 700, das in den Fig. 7A und 7B in dem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung dargestellt ist. Das Verfahren 700 ist ein Beispiel einer gemeinsamen differentiellen GPS-Verarbeitungstechnik. Der Betrieb des differentiellen Verfahrens 700 ist weiter unten beschrieben.

In einem Schritt 702 werden Navigationssignale empfangen an der Basisstation von den Satelliten  $SV_1, SV_2, SV_3$  und  $SV_4$ . Ein Pseudoabstand ( $PSR_i$ ) wird für jeden Satelliten, in einem Schritt 704, berechnet. Eine Position für jeden Satelliten wird berechnet in einem Schritt 706 unter Verwendung der ephemerischen Daten und der GPS-Zeit. Unter Verwendung der Position und des Pseudoabstands für jeden Satelliten und der bekannten Position der Basisstation in einem Schritt 708 wird ein Uhrenfehler für den Basisempfänger berechnet. 15

In einem Schritt 709 wird der Uhrenfehler verwendet, um jeden Pseudoabstand hinsichtlich Fehlern zu korrigieren, die durch Basisstation-Uhrendifferentiale eingeführt wurden. Als nächstes in einem Schritt 710 werden die Satellitenposition und die bekannte Position der Basisstation verwendet, um eine Reichweite ( $R_{iB}$ ) zwischen der Basisstation und jedem Satelliten zu berechnen. 20

In einem Schritt 712 wird jede Reichweite ( $R_{iB}$ ) von jedem verbesserten Pseudoabstand ( $PSR_{iB}$ ) subtrahiert, um einen Pseudoabstandsfehler für jeden Satelliten zu ergeben. 25

Diese Fehler werden an das Fahrzeug in einem Schritt 714 übertragen zur Verwendung und einer Verbesserung der Genauigkeit der Fahrzeugpositionsabschätzung.

In einem Schritt 716 werden Navigationssignale am Fahrzeug von den Satelliten  $SV_1, SV_2, SV_3$  und  $SV_4$  empfangen. Ein Pseudoabstand ( $PSR_{iv}$ ) für jeden Satelliten wird in einem Schritt 718 berechnet. In einem Schritt 720 werden die Fahrzeugpseudoabstände verbessert bzw. korrigiert unter Verwendung der Pseudoabstandsfehler, die von der Basisstation in einem Schritt 714 empfangen wurden. 30

Als nächstes in einem Schritt 722 wird eine Position für jeden Satelliten berechnet unter Verwendung der ephemerischen Daten und der GPS-Zeit. Schließlich wird ein Uhrenfehler und eine geschätzte Fahrzeugposition ( $x_v, y_v, z_v$ ) in einem Schritt 724 berechnet unter Verwendung der Satellitenpositionen und der verbesserten Pseudoabstände für die Satelliten  $SV_1, SV_2, SV_3$  und  $SV_4$ . 35

Man beachte, das in einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung, der Fahrzeugfehlervektor

$$\vec{E}_{v1}$$

folgendes aufweist: 40

- (1) ephemerische Fehler für die Satelliten  $SV_1, SV_2, SV_3$  (die in den Schritten 620—624 eingeführt wurden);
- (2) ein Fahrzeuguhrenfehler bzw. -abweichung (der primär im Schritt 619 eingeführt wurde);
- (3) ein Basisstationsuhrenfehler (der primär in einem Schritt 720 eingeführt wurde);
- (4) Vielpfadfehler (Reflektion) an dem Fahrzeug aufgrund des Satelliten  $SV_1$  (die primär in einem Schritt 619 eingeführt wurden); und
- (5) atmosphärische Fehler in dem Pseudoabstand des Satelliten  $SV_1$  (die primär in einem Schritt 619 eingeführt wurden). — 50

Der Basisstationsfehlervektor

$$\vec{E}_{B1}$$

weist folgendes auf: 55

- (1) ephemerische Fehler für die Satelliten  $SV_1, SV_2, SV_3$  (eingeführt in den Schritten 610—614);
- (2) einen Basisstationsuhrenfehler (eingeführt primär an dem Schritt 608); und
- (3) atmosphärische Fehler in dem Pseudoabstand des Satelliten  $SV_1$  (eingeführt primär in einem Schritt 608). 60

So, wenn der Basisstationsfehlervektor

$$\vec{E}_{B1}$$

von dem Fahrzeugfehlervektor 65

$\vec{E}_{v2}$ 

subtrahiert wird (diese Differenz ist der Positionsfehlervektor

 $\vec{P}_{\text{Fehler}}$ 

in einem Schritt 628, werden alle Fehler im wesentlichen negiert bzw. invertiert außer Vielpfadfehler (Reflektionen) an dem Fahrzeug aufgrund des Satelliten  $SV_1$  und dem Fahrzeuguhrenfehler. Dies ist eine riesige Verbesserung gegenüber konventionelle differentielle Techniken, weil Fehler, die aufgrund von Nicht-Linearitäten in dem Basisuhrenfehler resultieren, eliminiert werden. Jedoch ist die Erfindung fähig zur weiterer Fehlerkorrektur.

Falls die anfänglich geschätzte Fahrzeugposition des Schritts 602 unter Verwendung einer differentiellen Technik berechnet wird, wie zum Beispiel die in den Fig. 7A und 7B dargestellte, können Vielpfadfehler (Reflektionen) an dem Fahrzeug aufgrund des Satelliten  $SV_1$  und der Fahrzeuguhrenfehler bzw. -abweichungen ebenfalls eliminiert werden. Dies tritt in einem Schritt 630 ein, wenn die abgeschätzte Fahrzeugposition ( $P_v = x_v, y_v, z_v$ ) sowie der Positionsfehlervektor

 $\vec{P}_{\text{Fehler}}$ 

hinzugefügt wird.

Im wesentlichen, was in dem Schritt 630 auftritt, ist folgendes. Wenn die anfängliche Positionsabschätzung gemäß dem Verfahren 700 oder einem ähnlichen Verfahren berechnet wird, wird  $P_v$  negativ durch den Uhrenfehler des Fahrzeugempfängers (der GPS-Empfänger 406) beeinflusst werden und durch Reflektionen, die an dem Fahrzeug auftreten. So, wenn die geschätzte Fahrzeugposition ( $P_v$ ) zu dem Positionsfehlervektor

 $\vec{P}_{\text{Fehler}}$ 

hinzugefügt wird, können Uhrenabweichungsfehler und irgendwelche Vielpfadfehler im wesentlichen eliminiert werden.

Differentielle GPS-Techniken, wie zum Beispiel in der Fig. 7 dargestellt, können fähig sein, eine Fahrzeugpositionabschätzung zu erzeugen, die genau innerhalb ungefähr von 10 m ist. Der Erfinder hält es für möglich, daß das Verfahren 900 der Erfindung Fahrzeugpositionsabschätzungen innerhalb Zentimeter-Genauigkeit erzeugen kann.

Man beachte, daß das erfindungsgemäße Verfahren nicht erforderlich macht, daß dieselben Satelliten verwendet werden sowohl an der Basisstation als auch dem Fahrzeug. Das einzige Erfordernis ist, daß mindestens ein Satellit (zum Beispiel der Satellit  $SV_1$ ) verwendet wird, sowohl an der Basisstation als auch dem Fahrzeug. Man beachte jedoch, daß, falls nur ein gemeinsamer Satellit verwendet wird, die Genauigkeit des Systems reduziert werden wird, weil ephemerische Fehler von nicht gemeinsamen Satelliten nicht aus den Positionsberechnungen eliminiert werden. Trotzdem werden die meisten ephemerischen Fehler in einem Schritt 602 eliminiert unter Verwendung des Verfahrens von Fig. 7. So, sogar wenn nur ein gemeinsamer Satellit verfügbar ist, hält es der Erfinder für möglich, daß das System und das erfindungsgemäße Verfahren eine Genauigkeit erreicht, die mindestens so gut wie die der konventionellen Systeme ist, aber ohne das konventionelle Erfordernis von mindestens vier gemeinsamen Satelliten.

Die Erfindung basiert auf der folgenden Annahme. Die bekannten differentiellen GPS-Techniken können relativ genaue Fahrzeugpositionsabschätzungen (zum Beispiel genau innerhalb von 10 m) berechnen. Falls eine geschätzte Fahrzeugposition  $P_v$  relativ nahe der tatsächlichen Fahrzeugposition  $P_v$  ist, dann kann angenommen werden, daß die Größe eines Fehlers in einem von einem Satelliten  $SV_1$  empfangenen Pseudoabstand gleich dem Abstand  $d$  zwischen der tatsächlichen Fahrzeugposition  $P_v$  und der geschätzten Fahrzeugposition  $P_v$  ist. Dies ist in Fig. 8 dargestellt.

Fig. 8 stellt einen Satelliten  $SV_1$  dar, der einen gemessenen Pseudoabstand  $PSR'$  zu einer geschätzten Fahrzeugposition  $P_v$  und einen tatsächlichen Pseudoabstand  $PSR$  zu einer tatsächlichen Fahrzeugposition  $P_v$  besitzt. Der Winkel  $\alpha$  ist der Winkel, der zwischen den beiden Pseudoabstandsvektoren gebildet wird. Durch das Cosinus-Gesetz:

$$d^2 = PSR'^2 + PSR^2 - 2(PSR')(PSR)\cos\alpha$$

Aus der Untersuchung dieser Gleichung kann man feststellen, daß, falls die Pseudoabstände viel größer als  $d$  (d. h.  $PSR \gg d$ ) sind, dann angenommen werden kann, daß der Winkel  $\alpha$  sich Null nähert. Dies ist eine gültige Annahme, da die Pseudoabstände in der Größenordnung von 20 000 Kilometer sind, während der Abstand  $d$  von der Größenordnung von einem bis zehn Metern ist. In diesem Fall wird sich die Gleichung vereinfachen zu:

$$d = |PSR' - PSR|$$

Die differentielle Teil der Erfindung hat viele Anwendungen. Zum Beispiel kann das Verfahren durchgeführt werden unter Verwendung eines Pseudoabstands von einem ersten Satelliten und dann erneut durchgeführt werden unter Verwendung eines Pseudoabstands eines zweiten Satelliten. Die beiden Positionsabschätzungen können dann gemittelt werden für eine weitere Erhöhung in der Genauigkeit. Als ein weiteres Beispiel kann das Verfahren wiederholt werden für einige Satelliten und dann die Positionsfehlervektoren

$$\vec{P}_{\text{ERROR}}(i), \vec{P}_{\text{ERROR}}(i+1), \dots$$

für die Satelliten können verglichen werden. Die Satelliten mit dem kleinsten Positionsfehlervektoren können dann bei den Fahrzeugpositionsberechnungen verwendet werden, um präzise Positionsabschätzungen zu erzeugen.

Während die Erfindung insbesondere, unter Bezugnahme auf einige ihrer bevorzugten Ausführungsbeispiele gezeigt und beschrieben wurde, ergeben sich einem Fachmann verschiedene Abänderungen in Form und Detail, ohne von dem Geist und dem Geltungsbereich der Erfindung, wie er in den Patentansprüchen definiert wird, abzuweichen.

Zusammenfassend sieht die Erfindung folgendes vor. Ein differentielles System und ein Verfahren, um die Position eines mobilen Empfängers auf oder in der Nähe der Erdoberfläche zu berechnen unter Verwendung eines Basisempfängers, der eine bekannte Position besitzt und unter Verwendung eines satelliten-gestützten Navigationssystems, das eine Konstellation von Navigationssatelliten aufweist, ist offenbart. Das Verfahren weist die folgenden Schritte auf. Eine Basispositionsabschätzung wird für den Basisempfänger berechnet unter Verwendung eines Pseudoabstands von einem ersten Satelliten und Reichweiten von zwei anderen Satelliten. Eine erste Vektordifferenz zwischen der Basispositionsabschätzung und der bekannten Position des Basisempfängers wird berechnet. Eine anfängliche Positionsabschätzung wird für den mobilen Empfänger berechnet. Eine verfeinerte Positionsabschätzung wird berechnet für den mobilen Empfänger unter Verwendung eines Pseudoabstands von dem ersten Satelliten und Reichweiten von zwei anderen Satelliten. Eine zweite Vektordifferenz zwischen der anfänglichen Positionsabschätzung und der verfeinerten Positionsabschätzung des mobilen Empfängers wird berechnet. Schließlich wird eine dritte Vektordifferenz zwischen der ersten Vektordifferenz und der zweiten Vektordifferenz berechnet. Die Position des ersten Empfängers wird präzise berechnet, indem man die dritte Vektordifferenz zu der anfänglichen Positionsabschätzung für den mobilen Empfänger addiert.

#### Figurenbeschreibung

Fig. 3

- 102 GPS Satelliten
- 210 Fahrzeug
- 220 Basisstation
- 230 Pseudolites (s)
- 310 Fahrzeugpositioniersystem (VPS)
- 312 GPS-Verarbeitungssystem
- 314 Bewegungspositionierungssystem (MPS)
- 316 Fahrzeugkilometerzähler
- 318 Trägerreferenzeinheit (IRU)
- 320 Gyroskope
- 322 Beschleunigungsmesser
- 324 VPS-Verarbeitungssystem
- 326 MPS-Interkommunikationsprozessor
- 328 Externes Verarbeitungssystem

Fig. 4

- 404 Vorverstärker
- 406 GPS-Empfänger
- 408 GPS-Prozessor

Fig. 6A

- 602 Berechne eine geschätzte Fahrzeugposition ( $x_v, y_v, z_v$ )
- 604 An der Basisstation, empfangen Navigationssignale von den Satelliten  $SV_1, SV_2, SV_3$
- 606 Berechne eine Position für jeden Satelliten unter Verwendung der ephemerischen Daten und der GPS-Zeit
- 608 Berechne einen Pseudoabstand ( $PSR_{1B}$ ) zwischen der Basisstation und dem Satelliten  $SV_1$  unter Verwendung der Übertragungszeitverzögerungen
- 610 Verwende die Position ( $x_2, y_2, z_2$ ) des  $SV_2$  und der bekannten Position ( $x_B, y_B, z_B$ ) der Basisstation, zur Berechnung einer Reichweite ( $R_{2B}$ ) zwischen der Basisstation und dem  $SV_2$
- 612 Verwende die Position ( $x_3, y_3, z_3$ ) des  $SV_3$  und der bekannten Position ( $x_B, y_B, z_B$ ) der Basisstation, zur Berechnung einer Reichweite ( $R_{3B}$ ) zwischen der Basisstation und  $SV_3$

614 Löse:

$$(x_1 - x_B')^2 + (y_1 - y_B')^2 + (z_1 - z_B')^2 = \text{PSR}_{1B}^2$$

$$5 \quad (x_2 - x_B')^2 + (y_2 - y_B')^2 + (z_2 - z_B')^2 = R_{2B}^2$$

$$(x_3 - x_B')^2 + (y_3 - y_B')^2 + (z_3 - z_B')^2 = R_{3B}^2$$

um eine geschätzte Position  $(x_B', y_B', z_B')$  der Basisstation zu ergeben

10

Fig. 6B

616 Berechne einen Fehlervektor

$$15 \quad \begin{aligned} E_{1B} &= (x_B' - x_B), (y_B' - y_B), (z_B' - z_B) \\ &= (x_E, y_E, z_E)_{1B} \end{aligned}$$

zwischen der geschätzten Basisposition  $(x_B', y_B', z_B')$  und der bekannten Basisposition  $(x_B, y_B, z_B)$

617 An dem Fahrzeug empfangen Navigationssignale von den Satelliten  $SV_1, SV_2$  und  $SV_3$

20 618 Berechne eine Position für jeden Satelliten unter Verwendung der ephemerischen Daten und der GPS-Zeit

619 Berechne einen Pseudoabstand  $(\text{PSR}_{1B})$  zwischen dem Fahrzeug und dem Satelliten  $SV_1$  unter Verwendung der Übertragungszeitverzögerungen

620 Verwende die Position  $(x_2, y_2, z_2)$  von  $SV_2$  und die geschätzte Position  $(x_v', y_v', z_v')$  des Fahrzeugs, zur Berechnung einer Reichweite  $(R_{2v})$  zwischen der geschätzten Fahrzeugposition und dem  $SV_2$

25 622 Berechne die Position  $(x_3, y_3, z_3)$  des  $SV_3$  und die geschätzten Position  $(x_v', y_v', z_v')$  des Fahrzeugs zur Berechnung einer Reichweite  $(R_{3v})$  zwischen der geschätzten Fahrzeugposition und dem  $SV_3$

Fig. 6C

30 624 Löse

$$(x_1 - x_v'')^2 + (y_1 - y_v'')^2 + (z_1 - z_v'')^2 = \text{PSR}_{1v}^2$$

$$(x_2 - x_v'')^2 + (y_2 - y_v'')^2 + (z_2 - z_v'')^2 = R_{2v}^2$$

$$35 \quad (x_3 - x_v'')^2 + (y_3 - y_v'')^2 + (z_3 - z_v'')^2 = R_{3v}^2$$

um eine neue geschätzte Position  $(x_v'', y_v'', z_v'')$  des Fahrzeugs zu ergeben

626 Berechne einen Fehlervektor

$$40 \quad \begin{aligned} E_{1v} &= (x_v'' - x_v'), (y_v'' - y_v'), (z_v'' - z_v') \\ &= (x_E, y_E, z_E)_{1v} \end{aligned}$$

zwischen der neuen geschätzten Fahrzeugposition  $(x_v'', y_v'', z_v'')$  und der anfänglichen geschätzten Fahrzeugposition  $(x_v', y_v', z_v')$

45 628 Berechne einen Positionsfehlervektor  $P_{\text{Fehler}}$  für das Fahrzeug, indem man den Fehlervektor  $P_{1B}$ , der an der Basisstation berechnet wurde, von dem Fehlervektor  $P_{1v}$ , der an dem Fahrzeug berechnet wurde, abzieht:

$$50 \quad \begin{aligned} P_{\text{Fehler}} &= \bar{E}_{1v} - \bar{E}_{1B} \\ &= (x_v'' - x_v' - x_B' + x_B), (y_v'' - y_v' - y_B' + y_B), \\ &\quad (z_v'' - z_v' - z_B' + z_B) \end{aligned}$$

55 630 Berechne die tatsächliche Fahrzeugposition  $(x_v, y_v, z_v)$ , indem man  $P_{\text{Fehler}}$  zu der geschätzten Fahrzeugposition  $(x_v', y_v', z_v')$  addiert.

Fig. 7A

60

702 Empfange Navigationssignale an der Basisstation von den Satelliten  $SV_1, SV_2, SV_3$  und  $SV_4$

704 Berechne einen Pseudoabstand  $(\text{PSR}_{1B})$  für jeden Satelliten unter Verwendung der Übertragungszeitverzögerungen

706 Berechne eine Position für jeden Satelliten unter Verwendung der ephemerischen Daten und der GPS-Zeit

65 708 Verwende die Position und Pseudoabstand für jeden Satelliten und die bekannte Position der Basisstation zur Berechnung eines Uhrenfehlers oder -abweichung für den Basisempfänger

709 Verwende den Uhrenfehler, um jeden Pseudoabstand zu korrigieren

710 Verwende die ephemerischen Daten und die bekannte Position der Basisstation, zur Berechnung einer



Reichweite ( $R_{1B}$ ) zwischen der Basisstation und jedem Satelliten

712 Subtrahiere jede Reichweite ( $R_{1B}$ ) von jedem verbesserten Pseudoabstand ( $PSR_{1B}$ ), um eine Pseudoabstandsabweichung für jeden Satelliten zu ergeben

714 Übertrage die Pseudoabstandsfehler bzw. -abweichungen an das Fahrzeug

Fig. 7B

716 Empfange die Navigationssignale am Fahrzeug von den Satelliten  $SV_1, SV_2, SV_3$  und  $SV_4$

718 Berechne einen Pseudoabstand ( $PSR_{1V}$ ) für jeden Satelliten unter Verwendung der Übertragungszeitverzögerungen

720 Verbessere jeden Pseudoabstand unter Verwendung der Pseudoabstandsabweichung von der Basisstation

722 Berechne eine Position für jeden Satelliten unter Verwendung der ephemerischen Daten und der GPS-Zeit

724 Verwende die Satellitenpositionen und die verbesserten Pseudoabstände für die Satelliten  $SV_1, SV_2, SV_3$  und  $SV_4$ , zur Berechnung des Uhrenfehlers für den

Fahrzeugempfänger und einer geschätzten Fahrzeugposition ( $x_v, y_v, z_v$ )

Fig. 9

902 Berechne eine Positionsabschätzung ( $P_B$ ) für die Basisstation unter Verwendung eines Pseudoabstands von einem ersten Satelliten ( $SV_1$ ) und Reichweiten von zwei anderen Satelliten

904 Subtrahiere die bekannte Position ( $P_B$ ) der Basisstation von  $P_B$ , um einen Basisfehlervektor

$\vec{E}_B$

zu erzeugen

906 Berechne oder schätze eine anfängliche Positionsabschätzung ( $P_v$ ) für das Fahrzeug unter Verwendung bekannter Techniken

908 Berechne eine verfeinerte Positionsabschätzung ( $P_v'$ ) für das Fahrzeug unter Verwendung eines Pseudoabstands von dem Satelliten  $SV_1$  und Reichweiten von zwei anderen Satelliten

910 Subtrahiere  $P_v$  von  $P_v'$ , um einen Fahrzeugfehlervektor

$\vec{E}_v$

zu erzeugen

912 Berechne die endgültige Fahrzeugposition  $P_v$ , indem man die Differenz zwischen dem Fahrzeugfehlervektor und den Basisfehlervektor zu der anfänglichen Fahrzeugpositionsabschätzung ( $P_v$ ) addiert:

$$P_v = P_v' + \vec{E}_v - \vec{E}_B$$

#### Patentansprüche

1. Verfahren, um die Position eines mobilen Empfängers auf oder in der Nähe der Erdoberfläche zu berechnen unter Verwendung eines Basisempfängers, der eine bekannte Position besitzt und unter Verwendung eines satelliten-gestützten Navigationssystems, das eine Konstellation von Navigationssatelliten aufweist, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist:

(a) Berechnen einer Basispositionsabschätzung für den Basisempfänger unter Verwendung eines Pseudoabstands von einem ersten Satelliten und Reichweiten von zwei anderen Satelliten;

(b) Berechnen einer ersten Vektordifferenz zwischen der Basispositionsabschätzung und der bekannten Position des Basisempfängers;

(c) Berechnen einer anfänglichen Positionsabschätzung für den mobilen Empfänger;

(d) Berechnen einer verfeinerten Positionsabschätzung für den mobilen Empfänger unter Verwendung eines Pseudoabstands von dem ersten Satelliten und Reichweiten von zwei anderen Satelliten;

(e) Berechnen einer zweiten Vektordifferenz zwischen einer anfänglichen Positionabschätzung und der verfeinerten Positionsabschätzung des mobilen Empfängers;

(f) Berechnen einer dritten Vektordifferenz zwischen der ersten Vektordifferenz und der zweiten Vektordifferenz; und

(g) Addieren der dritten Vektordifferenz zu der anfänglichen Positionsabschätzung für den mobilen Empfänger, um eine letzte Positionsabschätzung für den mobilen Empfänger zu erzeugen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die anfängliche Positionsabschätzung berechnet wird unter Verwendung einer Triangulierungstechnik und Pseudoabständen und Satellitenpositionen von mindestens vier Satelliten.

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die anfängliche Positionsabschätzung berechnet wird unter Verwen-

5  
10  
15  
20  
25  
30  
35  
40  
45  
50  
55  
60  
65

ung einer differentiellen Technik.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die beiden anderen Satelliten des Schrittes (a) die gleichen sind wie die beiden anderen Satelliten des Schrittes (d).

5. Verfahren, um die Position eines ersten Empfängers auf oder in der Nähe der Erdoberfläche zu berechnen unter Verwendung eines zweiten Empfängers, der eine bekannte Position besitzt und unter Verwendung eines satelliten-gestützten Navigationssystems, das eine Konstellation von Navigationssatelliten aufweist, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

(a) Empfangen, von einer ersten Vielzahl von Navigationssatelliten, einer ersten Vielzahl von Navigationssignalen an dem ersten Empfänger;

(b) Berechnen, von der ersten Vielzahl von Navigationssignalen, einer Positionsabschätzung für den ersten Empfänger;

(c) Empfangen, von einer Vielzahl der Navigationssatelliten, einer zweiten Vielzahl von Navigationssignalen an dem zweiten Empfänger, wobei die erste und zweite Vielzahl von Satelliten einen ersten Satelliten, der gemeinsam zu beiden ist, aufweist;

(d) Berechnen, von jedem Navigationssignal, einer Satellitenposition;

(e) Berechnen, von dem Navigationssignal von dem ersten Satelliten, eines ersten Pseudoabstands zwischen dem zweiten Empfänger und dem ersten Satelliten;

(f) Berechnen, von der Position eines zweiten Satelliten und der bekannten Position des zweiten Empfängers, einer ersten Reichweite zwischen dem zweiten Satelliten und dem zweiten Empfänger;

(g) Berechnen, von der Position eines dritten Satelliten und der bekannten Position des zweiten Empfängers, einer zweiten Reichweite zwischen dem dritten Satelliten und zweiten Empfänger;

(h) Berechnen, von dem ersten Pseudoabstand, der ersten Reichweite, der zweiten Reichweite und den Positionen für den ersten, zweiten und dritten Satelliten, einer geschätzten Position für den zweiten Empfänger;

(i) Berechnen einer Differenz zwischen den geschätzten und den bekannten Positionen des zweiten Empfängers, um einen ersten Fehlervektor zu bestimmen;

(j) Berechnen, von der ersten Vielzahl der Navigationssignale, einer Positionsabschätzung für den ersten Empfänger;

(k) Berechnen, von dem Navigationssignal von dem ersten Satelliten, eines zweiten Pseudoabstands zwischen dem ersten Empfänger und dem ersten Satelliten;

(l) Berechnen, von der Position eines zweiten Satelliten und einer geschätzten Position des ersten Empfängers, einer dritten Reichweite zwischen dem zweiten Satelliten und dem ersten Empfänger;

(m) Berechnen, von der Position eines dritten Satelliten und der geschätzten Position des ersten Empfängers, einer vierten Reichweite zwischen dem dritten Satelliten und dem ersten Empfänger;

(n) Berechnen, von dem zweiten Pseudoabstand, der dritten Reichweite, der vierten Reichweite und den Positionen für den ersten, zweiten und dritten Satelliten einer verfeinerten geschätzten Position des ersten Empfängers;

(o) Berechnen einer Differenz zwischen der verfeinerten geschätzten Position und der geschätzten Position des ersten Empfängers, um einen zweiten Fehlervektor zu bestimmen;

(p) Berechnen der Differenz zwischen den ersten und zweiten Fehlervektoren, um einen dritten Fehlervektor für den ersten Empfänger zu bestimmen; und

(q) Verwenden des dritten Fehlervektors, um die geschätzte Position des ersten Empfänger zu korrigieren.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei die Positionsabschätzung des Schritts (j) berechnet wird unter Verwendung einer differentiellen Technik.

7. Vorrichtung, um die Position eines mobilen Empfängers auf oder in der Nähe der Erdoberfläche zu berechnen unter Verwendung eines Basisempfängers, der eine bekannte Position besitzt und unter Verwendung eines satelliten-gestützten Navigationssystems, das eine Konstellation von Navigationssatelliten aufweist, wobei die Vorrichtung folgendes aufweist:

(a) Mittel, gekoppelt bzw. befestigt an dem Basisempfänger, um eine Basispositionsabschätzung zu berechnen unter Verwendung eines Pseudoabstands von einem ersten Satelliten und Reichweiten von zwei anderen Satelliten und um eine erste Vektordifferenz zwischen der Basispositionsabschätzung und der bekannten Position des Basisempfängers zu berechnen;

(b) Mittel, um eine anfängliche Positionsabschätzung für den mobilen Empfänger zu berechnen;

(c) Mittel, gekoppelt bzw. befestigt an den mobilen Empfänger, um eine verfeinerte Positionsabschätzung für den mobilen Empfänger zu berechnen unter Verwendung eines Pseudoabstands von dem ersten Satelliten und Reichweiten von zwei anderen Satelliten, und um eine zweite Vektordifferenz zwischen der anfänglichen Positionsabschätzung und der verfeinerten Positionsabschätzung des mobilen Empfängers zu berechnen; und

(d) Mittel, um eine dritte Vektordifferenz zwischen der ersten Vektordifferenz und der zweiten Vektordifferenz zu berechnen und um die dritte Vektordifferenz zu einer anfänglichen Positionsabschätzung für den mobilen Empfänger zu addieren, um eine letzte Positionsabschätzung für den mobilen Empfänger zu erzeugen.

Hierzu 12 Seite(n) Zeichnungen

900

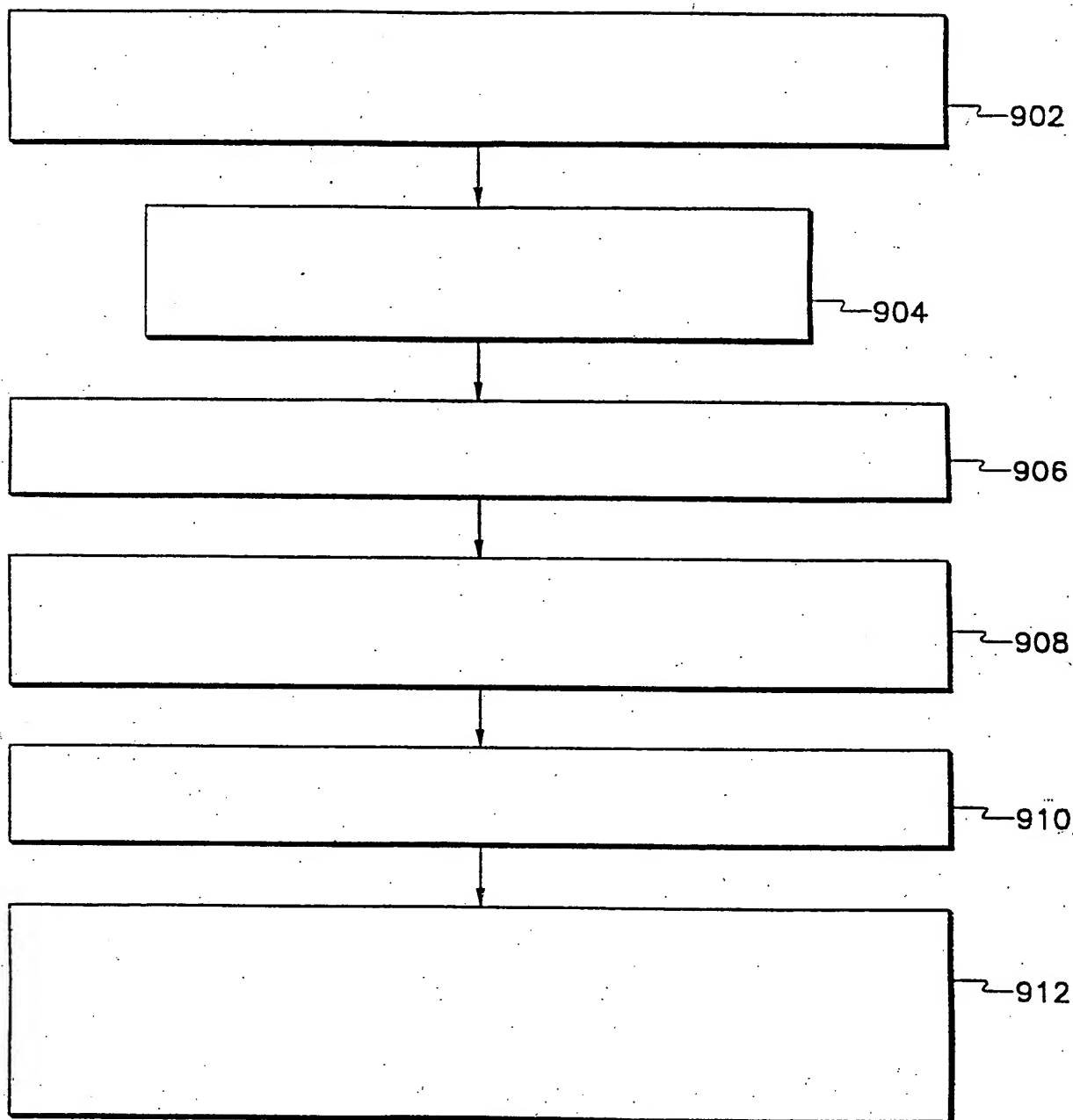


Fig. 9

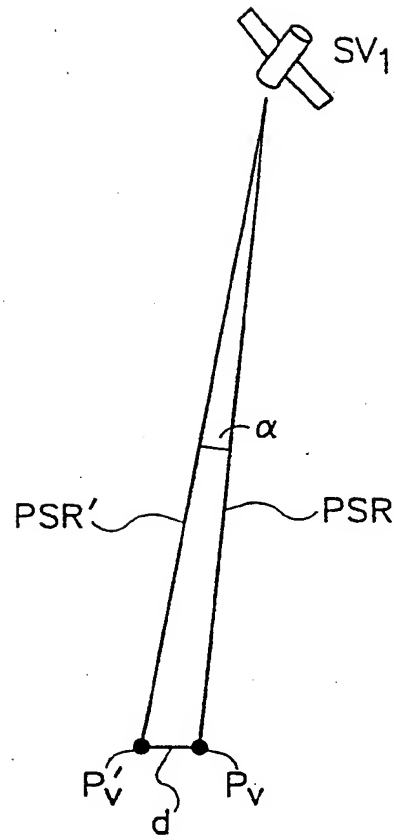


Fig. 8

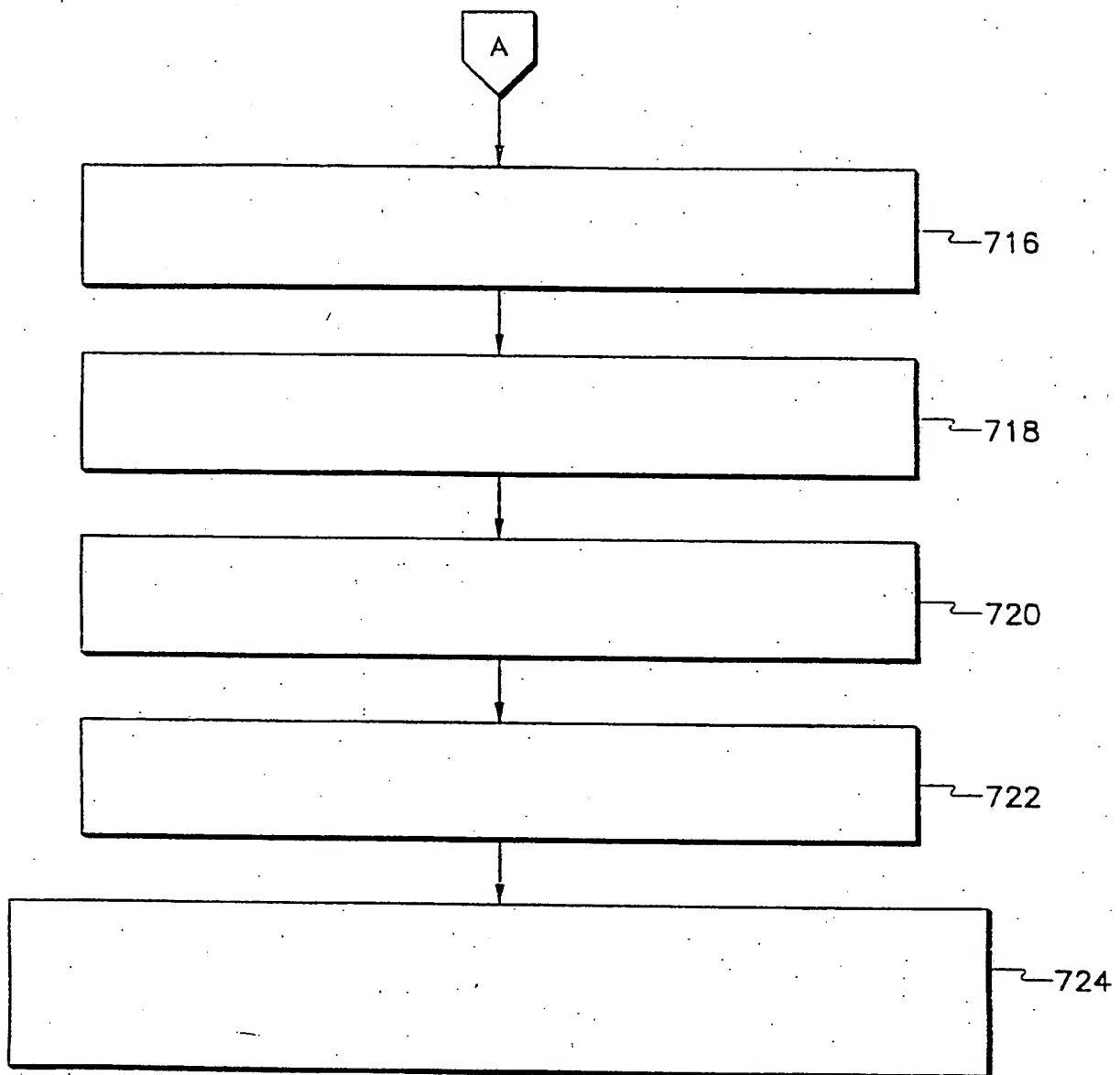


Fig. 7B

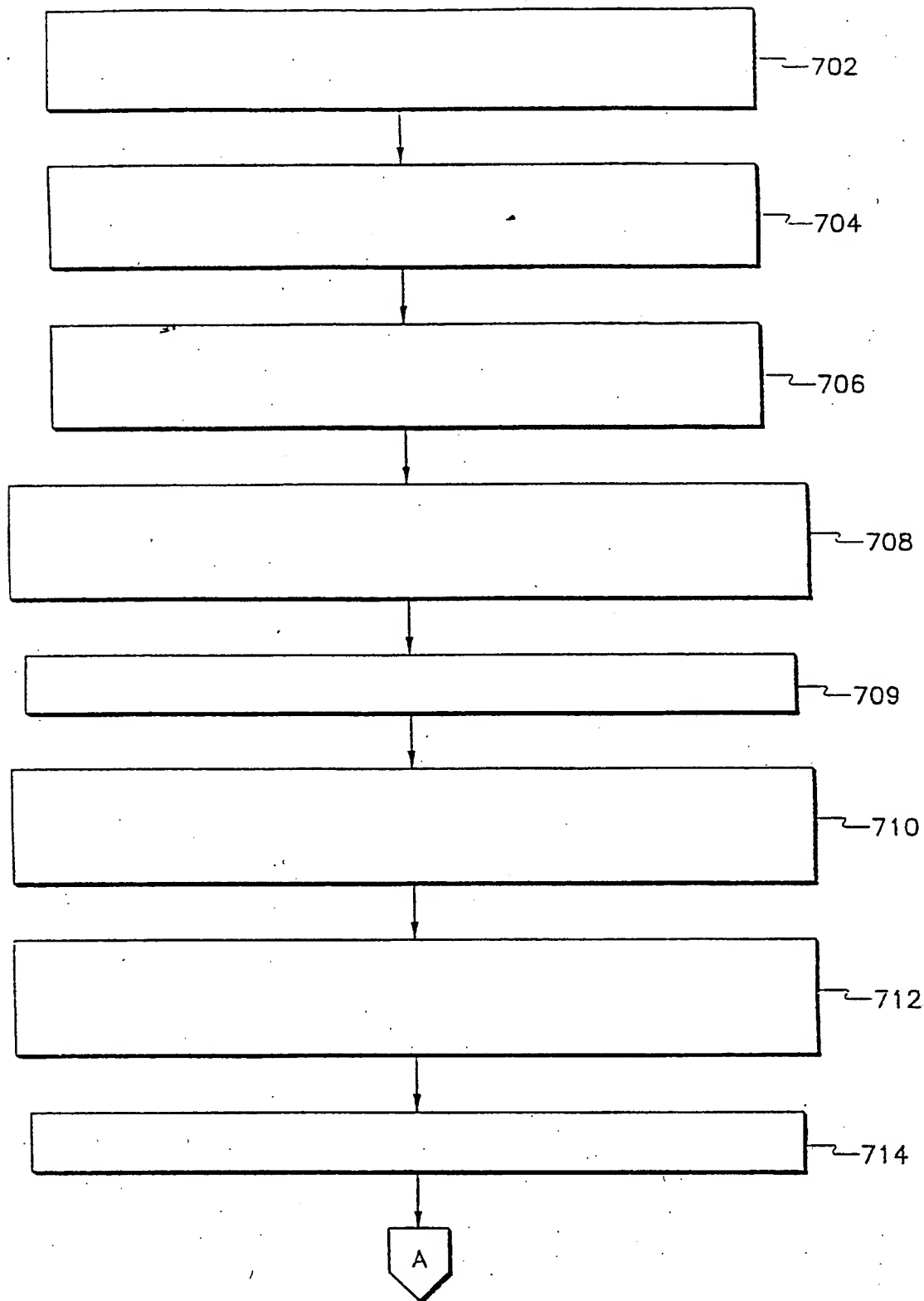


Fig. 7A



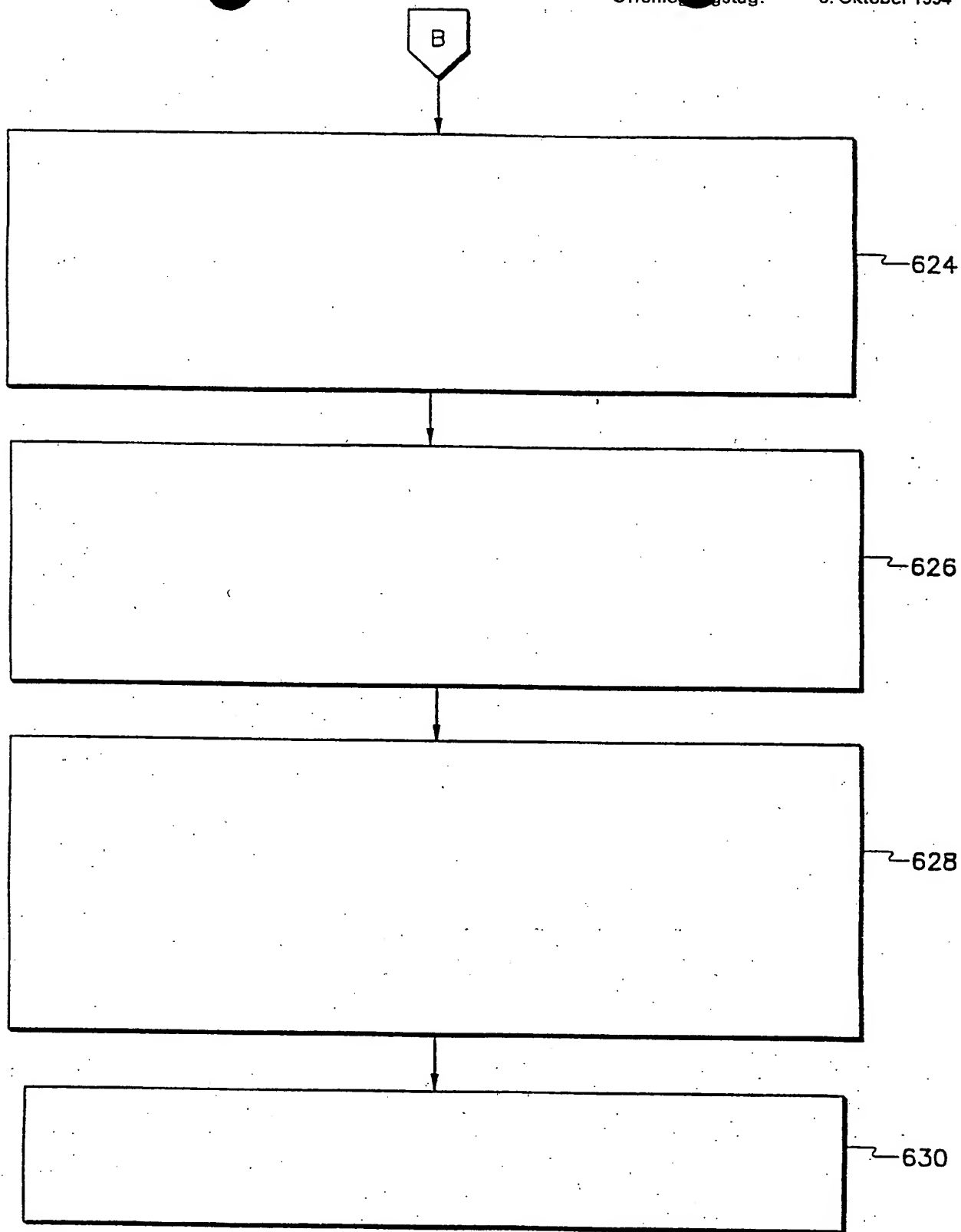


Fig. 6C

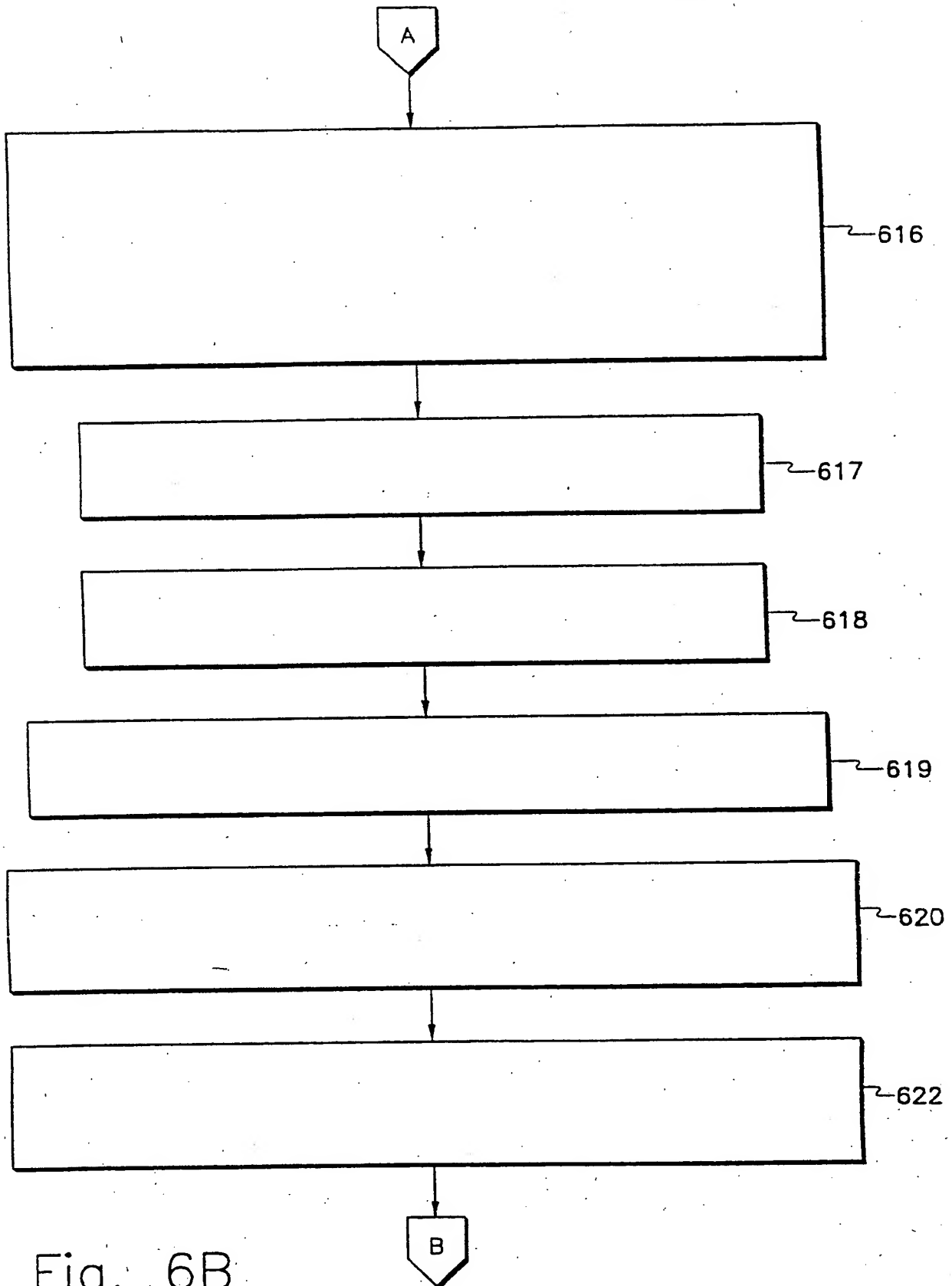


Fig. 6B

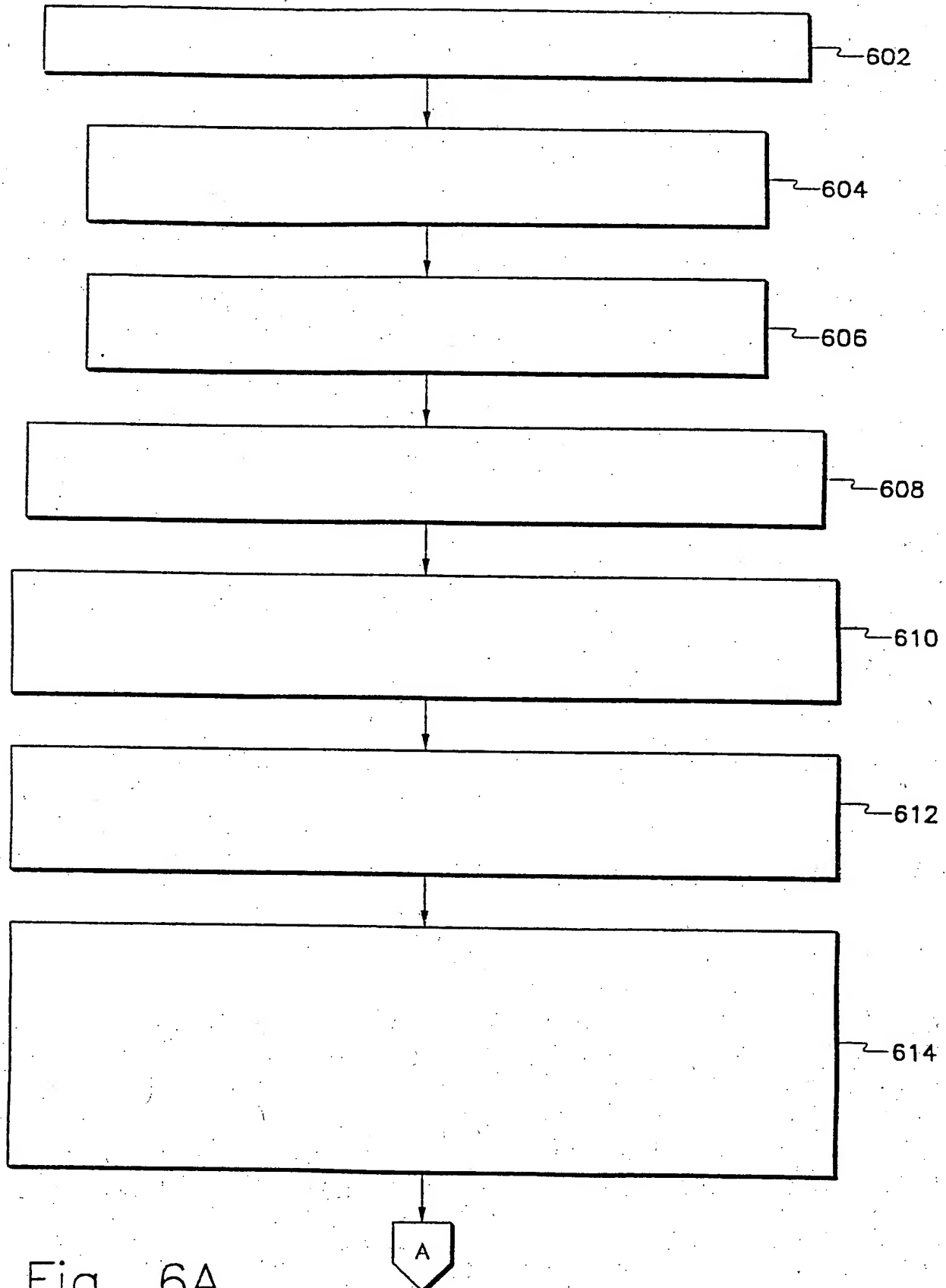


Fig. 6A

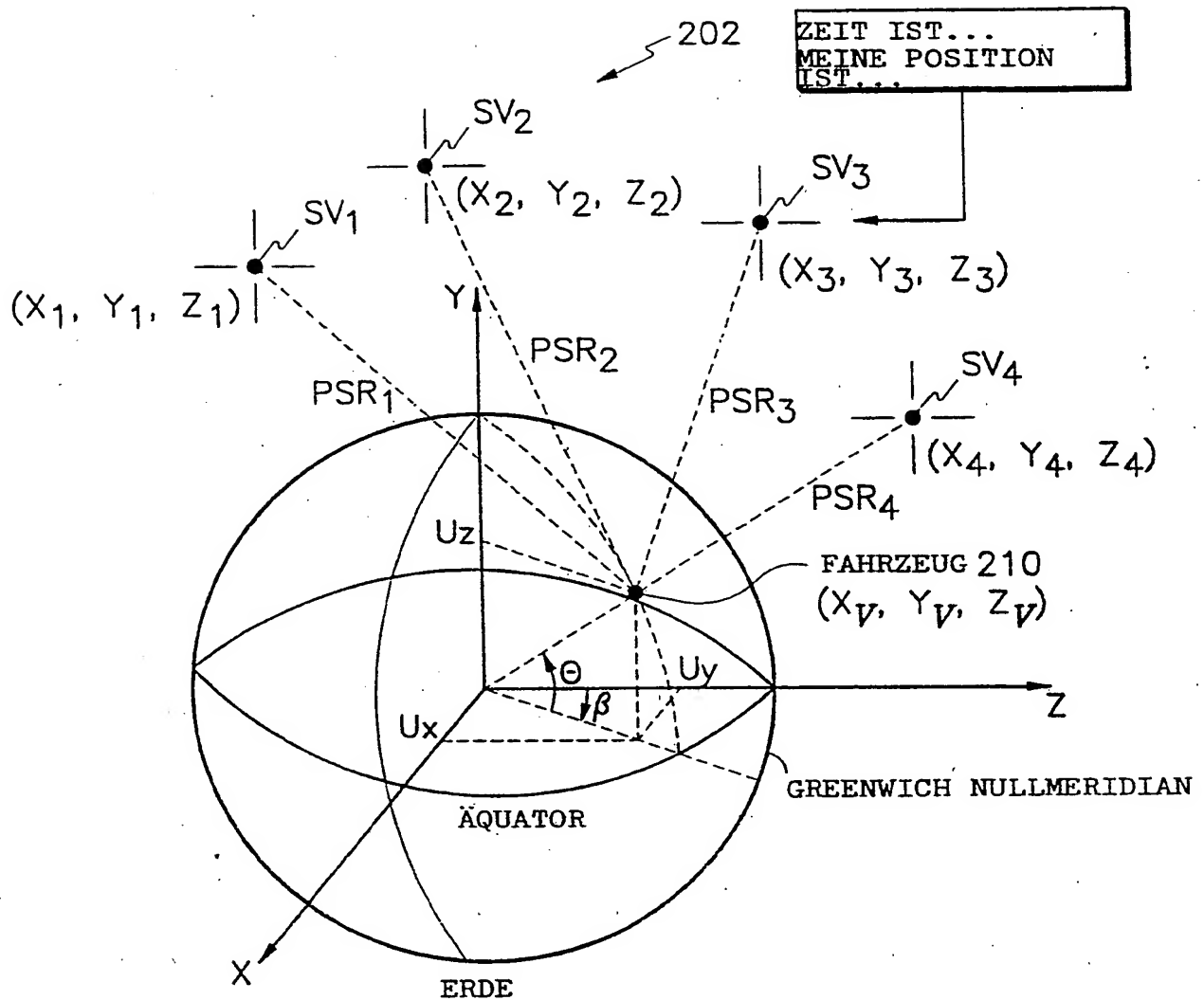


Fig. 5

312

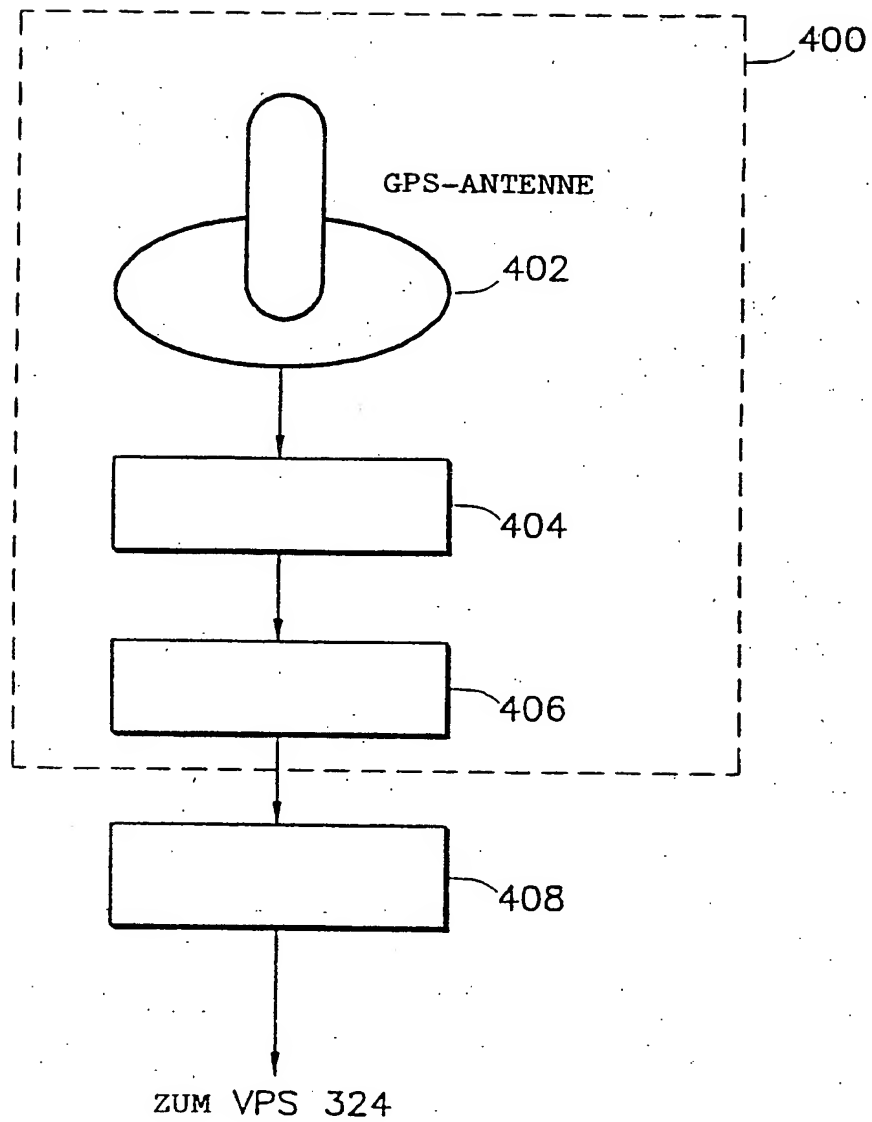


Fig. 4

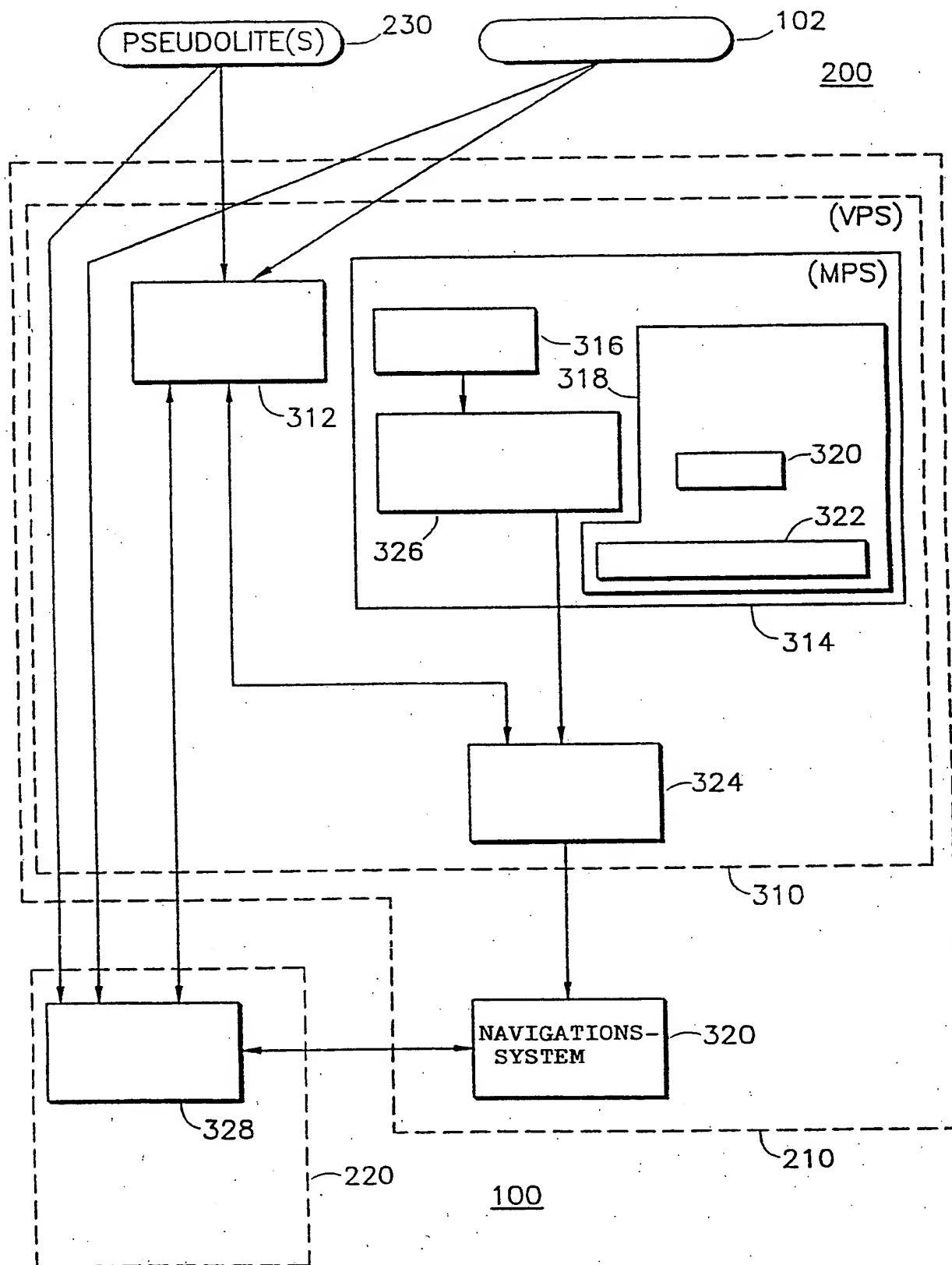


Fig. 3



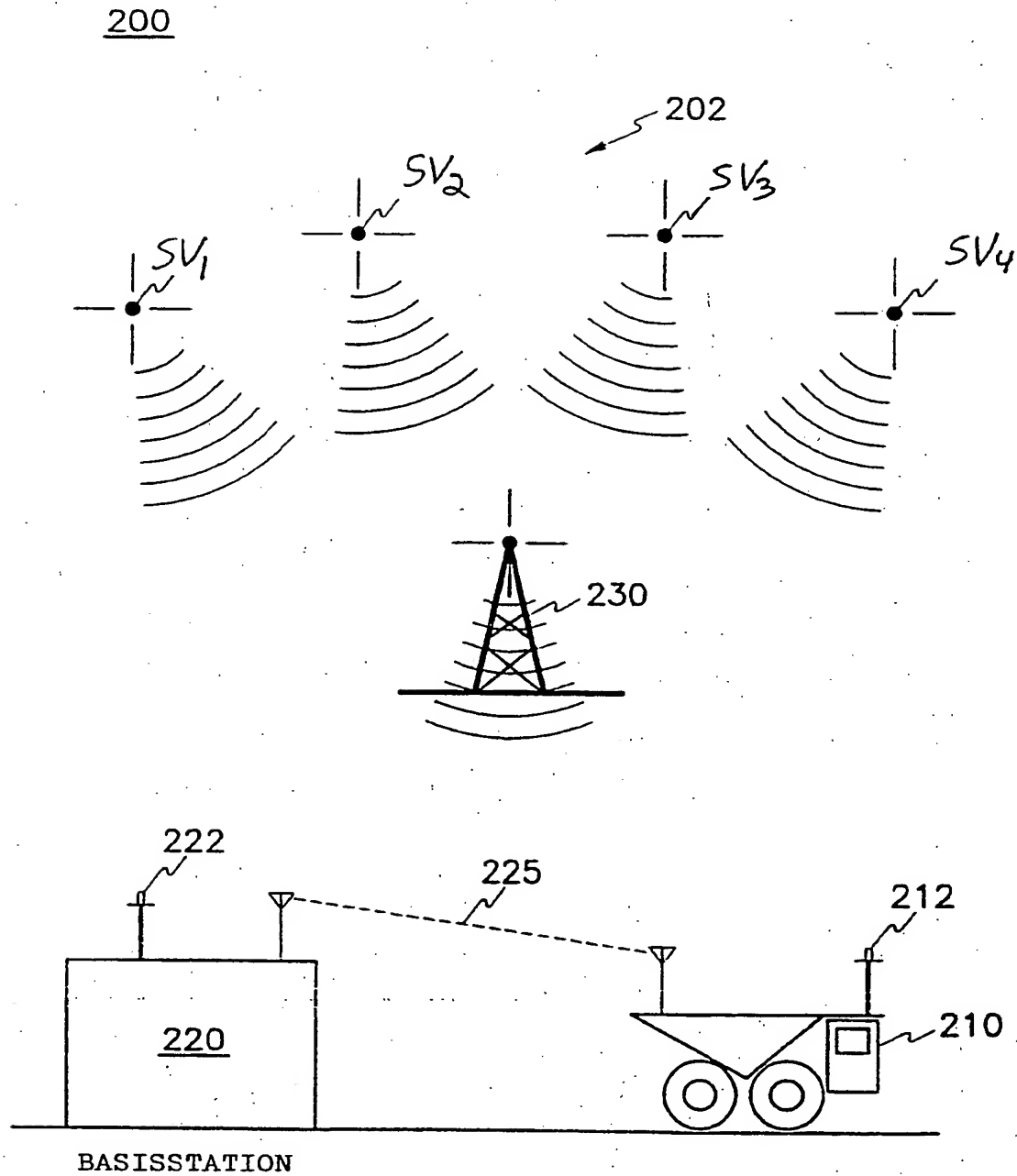


Fig. 2

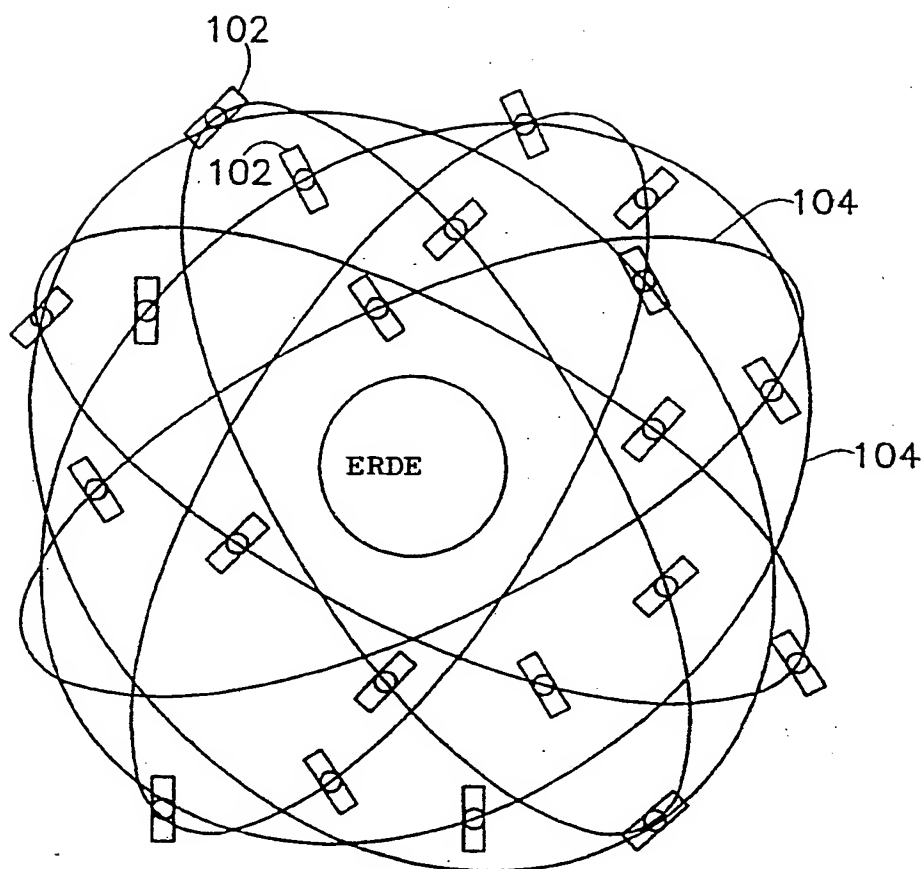


Fig. 1